



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



Treball Final de Grau

Desenvolupament d'eines didàctiques per a l'aprenentatge de control de processos industrials

Grau en Enginyeria química

Curs 17/18

Autor: Jaume Servitja Solé

Director: Antonio David Dorado Castaño i Teresa Escobet Canal

Data: 10/01/2018

Localitat: Manresa

A la meva parella i família.

RESUM DEL PROJECTE

En els següent treball de final de grau s'estudia la possibilitat de realitzar unes pràctiques amb finalitats acadèmiques per al estudi del control automàtic en l'àmbit de la indústria química.

Es treballarà en dues maquetes que representen dos processos bàsics i molt comuns en el control automàtic de la indústria química. La primera estació es centra en un control de nivell i per a la segona es planteja un control de pressió.

Per tal de realitzar el guió de pràctiques és plantegen, s'apliquen i s'avaluen diverses tècniques de modelització de sistemes i sintonia d'estructures de control PID. Addicionalment es realitza una simulació amb l'eina Simulink del programa Matlab del comportament de les estacions en llaç obert i també, un cop s'ha establert l'estructura de control, del comportament en el llaç tancat amb el regulador instal·lat.

Finalment es fa una proposta per al guió de pràctiques realitzant tenint en compte els resultats trobats en l'estudi de les estacions.

ABSTRACT

In the following project we develop some exercises with the objective of training in automatic control focused in the chemical industry.

The exercises will be done with two scale models that represent two basic and very common control process in the chemical industry. The first station focus on level control and for the second one a pressure control is studied

In order to carry out the practice guideline, several systems modeling and tuning techniques for PID control structures are proposed, applied and evaluated. Additionally, a simulation with the Simulink tool in the Matlab program is performed on the behavior of the stations in open loop. Additionally once the control structure has been established the response of the scale models are also simulated.

Finally, a proposal is made for the practice guideline, taking into account the results found in the study of the stations.

ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	2
1.1. CONTEXT DEL TREBALL	2
1.1.1. Control en la indústria química	2
1.2. CONCEPTES TEÒRICS	6
1.2.1. Control i Automatització	6
1.2.2. Control en llaç obert i tancat	7
1.2.3. Controladors i sistema controlat	9
1.2.4. Sintonia de controladors	15
1.2.5. Modelització i simulació	20
2. OBJECTIUS	28
3. ANTECEDENTS	29
4. DESCRIPCIÓ MATERIALS I MÈTODES	31
4.1. ESTACIONS DE TREBALL	31
4.1.1. Maquetes utilitzades	31
4.1.2. Descripció dels components de les estacions	31
4.2. ESTACIÓ DE CONTROL DE NIVELL	37
4.3. ESTACIÓ DE PRESSIÓ	40
5. RESULTATS	43
5.1. MODELS MATEMÀTICS	43
5.1.1. Estació de nivell	43
5.1.2. Estació de pressió	52
5.2. CALIBRATGE	56
5.2.1. Estació de nivell	56
5.2.2. Estació de pressió	67
5.3. SIMULACIÓ DEL MODEL	73
5.3.1. Simulació de l'estació de nivell	73

5.3.2. Simulació de l'estació de pressió	79
5.4. CONTROLADORS	81
5.4.1. Controladors estació de nivell	81
5.4.2. Controladors estació de pressió	91
5.5. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	96
5.5.1. Resultats per els models de les estacions	96
5.5.2. Resultats per a la sintonia de controladors	99
6. CONCLUSIONS	102
6.1. PROPOSTA DE PRÀCTICA DOCENT	101
7. BIBLIOGRAFIA	104
8. ANNEXOS	105
8.1. ANNEX 1:PROPOSTA DE GUIÓ DE PRÀCTIQUES	105
1. <i>Introducció i fonaments teòrics</i>	105
2. <i>Sintonia de controladors</i>	105
3. <i>Materials i mètode</i>	107
4. <i>Procediment</i>	112
5. <i>Tasques proposades</i>	118

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Context del treball

Aquest treball es centrarà en la modelització, simulació i control de dues plantes pilot. Es proposarà una proposta de pràctica per a la seva realització amb els estudiants en base al treball fet.

El projecte engloba diversos conceptes des de la dinàmica de fluids, fins al control automàtic.

Abans de tot contextualitzarem l'àmbit del treball i la seva aplicació en la indústria química.

1.1.1. Control en la indústria química

En tot procés químic es necessari mantenir un control sobre les variables del mateix, ja sigui per garantir la seguretat del personal, la síntesi correcta de productes, l'optimització energètica i econòmica de la planta o el correcte funcionament de la mateixa.

Tot i que més endavant s'entrarà en més detall a definir el concepte de control per ara definirem un sistema de control com ha una estructura amb l'objectiu d'aconseguir uns certs resultats finals en un procés mitjançant la modificació de les variables que influeixen en ell. Un exemple quotidià podria ser el termòstat de una instal·lació de calefacció domèstica.

El sistema de control té l'objectiu de mantenir la o les variables controlades a un cert valor desitjat tot i les alteracions que les puguin afectar (*disturbance rejection*) i també el d'aconseguir un canvi suau i fluid quan es canvia el valor desitjat en la variable de referència (*set point tracking*).

Totes les plantes industrials tenen diversos nivells de control depenent de la complexitat del procés i la seva perillositat. Per aquest motiu, el control és un camp molt important relacionat amb l'enginyeria química.

El control industrial en el camp de la química és molt rigorós ja que donades les altes exigències per a la òptima realització en molts processos (temperatures elevades, exigències de qualitat, pressions extremes) es fa vital tenir un control exhaustiu de totes les variables que intervenen en el mateix.

Adquireix especial importància en les grans indústries de processos continus en les quals la planta esta operant 24 hores al dia durant llarg períodes de temps. Aquest tipus d'equipament solen involucrar instal·lacions de gran mida i capacitat.

Per aquest processos en continu és molt important l'eficiència i l'optimització del mateix i això passa per mantenir un control exhaustiu de les variables involucrades en el procés.

Els principals avantatges de el control automàtic (Coughanowr, 1965) són:

- Millor seguretat de procés
- Satisfer limitacions mediambientals
- Aconseguir especificacions de producte molt estrictes
- Incrementar l'aprofitament de les matèries primeres
- Augmentar el rendiment econòmic

En els següents apartats s'exposaran diversos exemples de les variables a controlar més típiques en la indústria química.

1.1.1.1. Control de nivell

El control de nivell consisteix generalment en una mesura automàtica de l'altura o nivell de un fluid mitjançant un sensor. És molt habitual en la indústria química.

Hi ha una gran varietat de tipus de sensor de nivell depenent de la seva aplicació. Alguns del tipus més utilitzats són:

- Flotador
- Pressió diferencial
- Sensor per bombolleig
- Capacitiu
- Ultrasònic
- Conductiu o resistiu

És de gran utilitat en tots aquells processos en els quals hi intervenen tancs. Ja sigui per com a mesura de seguretat per assegurar que el nivell no sobrepassa un cert punt o tot el contrari per assegurar que hi ha líquid i una bomba no treballa amb aire.

Una altra aplicació molt habitual dels sensors de nivell és el de l'emmagatzematge. S'utilitzen per obtenir informació sobre els nivells dins de dipòsits o altres recipients.

1.1.1.2. Control de pressió

La variable pressió és d'alta importància en operacions molt freqüents com és ara la destil·lació o l'evaporació. Tanmateix també és molt important establir-ne un control en sistemes de transport tant de gasos com líquids o en l'emmagatzematge de gasos.

La indústria del hidrocarburs en especial té múltiples processos en el que és necessària la instal·lació d'un control de pressió. Com es ara la destil·lació dels hidrocarburs.

L'objectiu dels sensor de pressió és convertir la mesura en un senyal elèctric. Els tipus de sensors es poden agrupar en:

- Mecànics
- Electromecànics
- Neumàtics
- Electrònics

1.1.1.3. Control de temperatura

La temperatura es vital en la indústria química. Hi ha nombroses operacions en les quals es convenient mantenir-ne un control exhaustiu.

En la majoria de processos perquè una reacció tingui lloc en les condicions adequades el medi on té lloc ha d'estar a una temperatura determinada. En molts casos una desviació en la temperatura d'operació provoca un canvi en el rendiment de la reacció o fins i tot la seva aturada.

En el cas particular de les reaccions exotèrmiques si no dissipem energia del procés la reacció es pot descontrolar i provocar greus incidents. Per tal de garantir-ne la seguretat és necessari un control automàtic de la temperatura.

La temperatura és la variable clau en diverses operacions unitàries com és ara l'evaporació o els intercanvis de calor. Sense un control exhaustiu de les temperatures en els diferents equips d'evaporació així com els corrents que els connecten no es pot assegurar un funcionament òptim. En el cas de no tenir la temperatura adequada en un dels evaporadors això afectaria a la composició de la solució o gas (depenent de l'objectiu del procés) final.

En el cas del intercanviadors de calor s'han de controlar la temperatura d'entrada del refrigerant i el component que es escalfat. Sense aquestes dades no és possible garantir que l'intercanviador esta funcionant correctament. En el cas de desviar-se dels valors òptim l'equip no serà capaç de mantenir l'eficiència per la operació.

Aquestes només són alguns del molts processos on la temperatura és rellevant. També cal tenir molt present que des de un punt de vista econòmic és molt important intentar no malgastar l'escalfor. Gran part de les despeses de la indústria química són en energia per tant millorant-ne l'aprofitament es millora el rendiment econòmic.

Els tipus més habitual de sensors de temperatura són:

- Sensors termoparell
- Sensors de temperatura per resistència
- Sensors bimetal·lics
- Sensors de temperatura per dilatació de fluid

- Sensors de canvi d'estat

La utilització d'un tipus o altre dependrà de l'aplicació de cada cas.

1.1.1.4. Control de pH

El control de pH ens indica el grau d'acidesa o basicitat d'una mescla. En general s'utilitzen sensors de bombeta de vidre. Depenent de les seves aplicacions en podem trobar variacions.

L'element sensible al pH dels elèctrodes de vidre és una bombeta de vidre que subministra un potencial electroquímic que depèn del valor de pH del producte. Aquest potencial es genera perquè els ions H^+ penetren a través de la capa exterior de la membrana mentre les ions amb càrrega negativa més grans romanen en la solució.

Es pot fer servir en certes reaccions amb compostos de pH diferents per a controlar la composició de la mescla. És molt utilitzat en gran varietat de processos de la indústria farmacèutica, alimentària i begudes i tractaments d'aigua entre d'altres.

És una variable altament utilitzada en el camp dels controls de qualitat per tal de garantir la puresa de productes.

En una altra instància en el qual la variable pH és molt utilitzada és en les depuradores o instal·lacions de tractaments de residus. S'utilitza per garantir que l'aigua tractada està a pH neutre abans de ser alliberada al medi ambient.

1.1.1.5. Control de cabal

El control del cabal ens permetrà quantificar el volum de circulació d'un fluid per la canonada on és realitzi el control.

Aquest tipus de mesura resulta útil en adquirir informació sobre els volums transportats per un sistema de canonades. Serà de gran utilitat en tot tipus d'indústries per quantificar els volums de fluids transportats.

Els controls en el cabal són necessaris en qualsevol tipus de procés reactiu en continu. De la mesura exacte dels cabals de productes d'entrada dependrà el correcte desenvolupament de la reacció.

Entre els tipus de sensors de cabal podem diferenciar.

- Cabalímetres ultrasònics
- Cabalímetres màssics
- Cabalímetres de disc oscil·lant
- Cabalímetres electromagnètics

- Rotàmetres
- Cabalímetres de turbina

1.2. Conceptes teòrics

Els conceptes fonamentals per tal de realitzar aquest treball estan relacionats sobretot amb el control automàtic de sistemes i en les lleis físiques que els regeixen.

1.2.1. Control i Automatització

Abans de definir que és un control i quins tipus existeixen és important contextualitzar la seva utilitat i en quines instàncies pot ser utilitzat.

Per a moltes cases en l'enginyeria, i en la vida quotidiana, s'han de mantenir certes variables com ara pressió, temperatura, corrent de processos o màquines constants, dins un cert rang o corba de treball. L'objectiu del control és aconseguir això mateix quan alguna fallada o inconsistència té lloc en el procés.

Per tant primer de tot es definirà que considerem com sistema o procés controlat.

A grans trets s'entén com a sistema de control un conjunt de dispositius que permeten influir en el funcionament del procés. Com a mínim es requereix que el sistema a controlar disposi d'una variable mesurada (variable de sortida) i una variable manipulada (variable d'entrada). En general es pot determinar la sortida del sistema a una entrada determinada utilitzant equacions matemàtiques deduïdes de les lleis físiques que ens descriuen el sistema.

Un exemple comú d'això mateix podria ser un reactor de la indústria química on s'obté un producte C a partir de la mescla de les substàncies A i B. L'objectiu del control seria mantenir una composició de C en el corrent de sortida. Per realitzar aquests control caldria disposar de vàlvules reguladores a cada conducte d'entrada per aportar més o menys quantitat de A i B. L'aportació de A i B pot fer variar la producció de C segons la dinàmica que tingui la reacció. Les relacions que s'estableixin entre les dues substàncies seran les utilitzades per dissenyar el sistema de control.

En aquest exemple es tindrien com a entrades els corrents de A i B i com a sortida el corrent C. Lògicament s'haurà de disposar d'algun aparell o sistema de mesura (sensor) per tal de conèixer la concentració de C.

Els sistemes solen ser representats en forma de diagrama de blocs. Aquesta representació permet aconseguir una visió genèrica i simplificada del problema.

En la Figura 1.1 es mostra un esquema i un diagrama de blocs per l'exemple anteriorment utilitzat del reactor d'una planta química. Les variables F_A , F_B i F_C representen el flux de les substàncies A, B i C, respectivament.

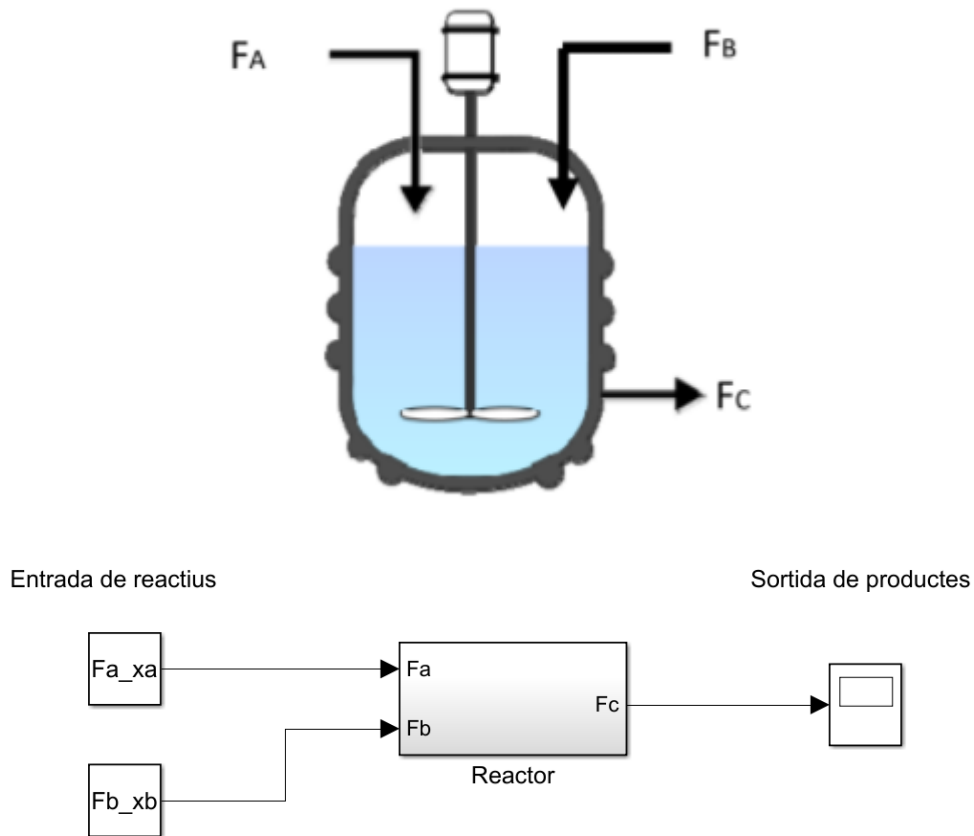


Figura 1.1: Representació de un reactor químic i de la seva simplificació en un diagrama de blocs.

1.2.2. Control en llaç obert i tancat

Un cop definit a grans trets el que s'entén com a sistema a controlar es pot parlar de els dos grans tipus de control, control en llaç obert i control en llaç tancat.

Control en llaç obert

L'estàndard alemany DIN 19 226 defineix com a llaç obert un procés que té lloc en un sistema a on una o més variables son l'entrada (*input*) i exerceixen influència sobre una o més variables de sortida (*output*) segons les lleis que regeixin el sistema en qüestió.

El tret característic del llaç obert és la naturalesa oberta de la seva acció, ja que les variables de sortida no exerceixen cap influència sobre les d'entrada.

Utilitzant l'exemple anteriorment descrit del reactor químic. Com ja s'ha comentat es pot establir mitjançant experimentació o aplicant les equacions pertinents la relació entre les substàncies A i B d'entrada amb la substància C de la sortida. Un cop aquesta relació és coneguda podem variar manualment les vàlvules dels corrents d'entrada per aconseguir una concentració de C desitjada.

El problema és que si per algun motiu la concentració d'alguna de les substàncies d'entrada varia per tal d'aconseguir la concentració desitjada de C s'hauran de fer els ajustos manualment. Si es vol que l'acció sigui automàtica s'haurà d'implementar un llaç tancat.

Control en llaç tancat

L'estàndard alemany DIN 19 226 defineix el llaç tancat com a un procés en el qual la variable de control (sortida del sistema) és supervisada i comparada contínuament amb la variable de referència (o objectiu de control). Depenen del resultat d'aquesta comparació, la variable d'entrada (o variable manipulada) és modificada per tal d'aconseguir la sortida desitjada. Aquesta estructura realimentada (*feed-back*) és la que defineix el llaç tancat i s'il·lustra en la Figura 1.2).

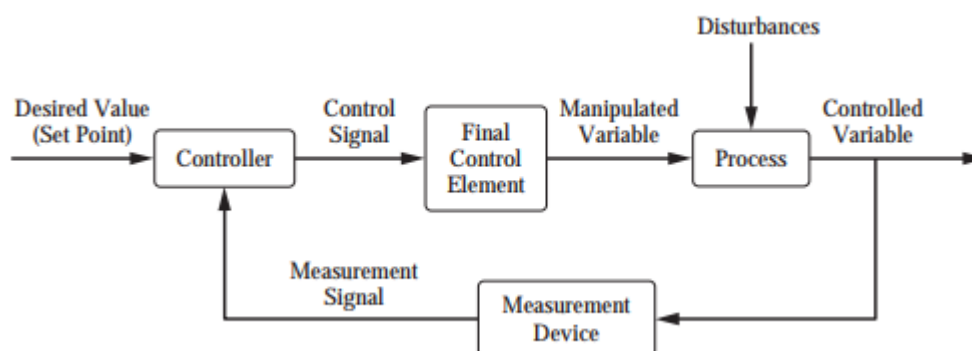


Figura 1.2: Estructura generalitzada per a un sistema amb llaç tancat (Coughanowr, 1965.)

Tornant a l'exemple del reactor químic es tindria un sensor, per exemple de pH a la sortida del reactor per tal de mesurar la concentració de C. El senyal de la mesura seria enviat al controlador que el compararia amb el senyal de referència que correspon a la concentració desitjada.

Un cop calculada la desviació entre la sortida i el senyal de referència el controlador, de manera automàtica, faria els canvis pertinents en els cabals productes de les substàncies d'entrada mitjançant vàlvules electròniques per tal d'aconseguir una sortida igual a la referència.

Tot i així s'ha de tenir molt en compte la dinàmica del reactor ja que depenen de la seva velocitat de resposta s'haurà d'ajustar el controlador. Per exemple si el sistema és lent i en

canvi la influència del controlador sobre la variable és ràpida i gran pot ocasionar grans fluctuacions en la sortida. Abans que el sistema hagi pogut “processar” els canvis fets en l'entrada el controlador actuarà de manera exagerada provocant un canvi massa gran de les variables d'entrada. En canvi si el sistema és més ràpid que el control només aconseguirem aproximar-nos al valor desitjat si els canvis es donen amb molta freqüència.

Per tal de dissenyar un bon control s'han de seguir els següents passos:

- Definir el sistema controlat i la variable a controlar
- Determinar el comportament del sistema
- Escollir l'estratègia de control adient en funció de les necessitats del sistema
- Escollir els aparells de mesura i actuació adients
- Ajustar (sintonitzar) el controlador per aconseguir la resposta desitjada.

1.2.3. Controladors i sistema controlat

1.2.3.1. Control de la resposta

Abans d'explicar els tipus de controladors més utilitzats a la indústria és important entendre que els diferents sistemes controlats poden tenir una gran variació en la seva resposta.

Com ja s'ha explicat amb anterioritat s'entén com a sistema controlat un procés per el qual es manté la variable o variables de control a un valor especificat. S'ha de tenir en compte que les variables a manipular per el controlador han de compensar les possibles distorsions dins el comportament del sistema així com els canvis que es puguin donar en les variables d'entrada.

Com és lògic abans de poder programar un controlador s'ha de conèixer com es comporta el sistema, ja sigui coneixent les lleis físiques que el regeixen o simplement fent un estudi estadístic del comportament del sistema davant dels canvis. Caldrà caracteritzar tant el comportament estàtic com el dinàmic.

Els models que utilitzen les lleis físiques en forma de equacions i relacions matemàtiques tenen com a característiques ser difícils i lents d'establir així com cars. Un cop és formulat té l'avantatge de definir totes les possibles eventualitats del sistema ja que es té un gran coneixement de com actua el sistema.

Els models que es centren en l'estudi de el comportament del sistema simplement fixant-se en la seva resposta s'anomenen models estadístics o de caixa negra. En contrast amb els físics són més fàcils i ràpids d'establir (i conseqüentment més barats) però tenen l'inconvenient de no definir amb tanta exactitud el procés com un de físic. Un model de

caixa negra es caracteritza per estudiar les respostes que produeix un sistema davant d'unes entrades. Es centra en conèixer com actua el sistema sense entrar en el detall de les lleis físiques que en regeixen el comportament.

1.2.3.2. Mode de operació dels diferents tipus de controladors

Cada sistema controlat ve determinat per el seu temps de resposta. Aquest temps depèn del sistema en si. Per tal de determinar-lo es solen fer experiments.

El controlador en si també és un sistema amb un temps de resposta determinat per l'enginyer per tal d'aconseguir un control satisfactori.

Controladors on-off

Un dels tipus de control més simple i a la vegada més utilitzat és el control on-off. Per aquest tipus de control el senyal de controlador només té dos valors possibles. Un valor per quan l'error de control és positiu i un altre per quan és negatiu.

Expressant-ho matemàticament:

$$u(t) = \begin{cases} u_{max} & \text{si } e > 0 \\ u_{min} & \text{si } e < 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

On $u(t)$ és la resposta del controlador, u_{max} el valor màxim del control, i u_{min} el valor mínim per al control que generalment serà 0, e és l'error entre la sortida del sistema i el senyal de referència o *set point*.

A la pràctica aquest tipus de controladors provoca grans oscil·lacions en els sistemes amb temps de resposta baixos ja que constantment aplica la màxima resposta possible per acte seguit passar a ser 0.

Un exemple clàssic d'aquest tipus de control podria ser la vàlvula per flotació de la cisterna d'un lavabo. Si la cisterna està buida l'aigua pot entrar al seu màxim cabal. Si en canvi arriba al nivell desitjat l'entrada d'aigua es tanca.

Controladors PID

Les tres components bàsiques que determinen el temps de resposta d'un controlador són el component proporcional (P), el component integral (I) i el component diferencial (D) (Åstrom, KJ, 1995).

Acció proporcional (P)

En un controlador proporcional la variable de sortida del controlador és proporcional a la desviació del sistema. Seguint la següent equació

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (r(t) - y(t)) \quad (1.2)$$

On $u(t)$ és l'entrada al sistema, regulada per el controlador, K_p és el guany proporcional, $e(t)$ és l'error de control, $r(t)$ és el *set point* del sistema i $y(t)$ la variable del sistema.

Té l'avantatge sobre el controlador on-off de fer un control molt més fi. Si la diferència entre la resposta del sistema i el set point és petita l'acció del controlador també serà petita així s'optimitza l'acció del controlador.

La funció bàsica d'aquest controlador seria la d'augmentar la variable de control proporcionalment al error de control (diferència entre el *set point* i la variable de resposta del sistema). Basant-nos en la anterior equació la funció de transferència o relació entre la variació de la sortida vers la variació de l'entrada per al controlador pot ser derivada de la següent forma.

$$C(s) = K_p \quad (1.3)$$

El inconvenient que presenten els controladors purament proporcionals és el de no poder aconseguir per ells sols una desviació del sistema de zero. Aquest tipus de controlador incorpora un error d'estat que fa que el sistema no arribi del tot al valor consigna a causa de la desviació del sistema i la variable manipulada.

Aquest error pot ser reduït incrementant el guany per això al seu torn provoca un fenomen de sobre oscil·lació. Aquest fet es pot observar en la Figura 1.3:

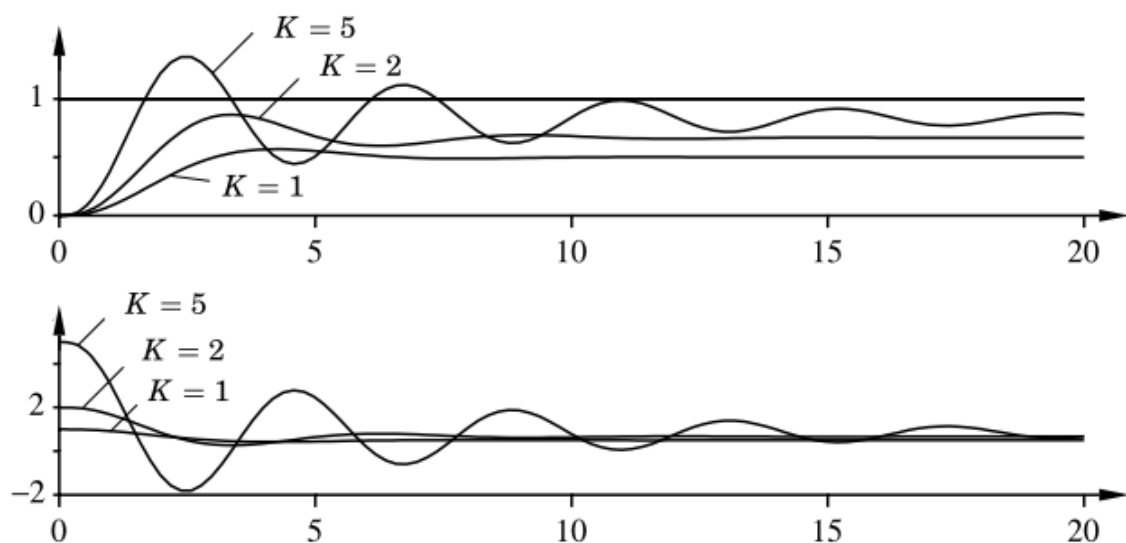


Figura 1.3: Simulació de un sistema enllaç tancat amb control proporcional per a diferents valors del guany K . El primer diagrama representa la resposta del sistema y mentre que el segon mostra la variació del senyal de control u . La funció de transferència del procés és $P(s) = 1/(s + 1)^3$ i la senyal del *set point* és 1 (Knospe, 2006).

Acció integral (I) i controlador PI

L'acció integral és proporcional a la integració del error del control en un determinat període de temps. La seva funció és la d'aconseguir una desviació zero en l'estat estacionari. Aquesta acció afegeix la desviació del sistema al llarg del temps.

Amb aquest controlador sempre que hi haguí una desviació en el sistema es corregirà per petita que sigui

La seva acció es pot definir amb:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (1.4)$$

On K_i és el guany integral.

Per tant la corresponent funció de transferència en el domini de Laplace serà:

$$C(s) = \frac{K_i}{s} \quad (1.5)$$

Cal notar que per a temps de integració petit la velocitat a la que actua el controlador disminueix i tarda menys a aconseguir un error d'estat de 0. Tot i així per a valors petits d'aquest temps també apareix el fenomen de la oscil·lació.

Gracies a la seva capacitat d'aconseguir un error d'estat de zero aquest tipus de controladors s'utilitzen en tàndem amb els proporcionals, donant lloc a un controlador PI.

Així tenint en ment la equació (1.3), que ens defineix la funció de transferència d'un controlador proporcional, l'expressió de la funció de transferència per a un controlador PI serà:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1.6)$$

On T_i és el temps d'integració.

En els següents diagrames es pot observar la mateixa comparació feta amb anterioritat per el controlador proporcional però per al controlador PI.

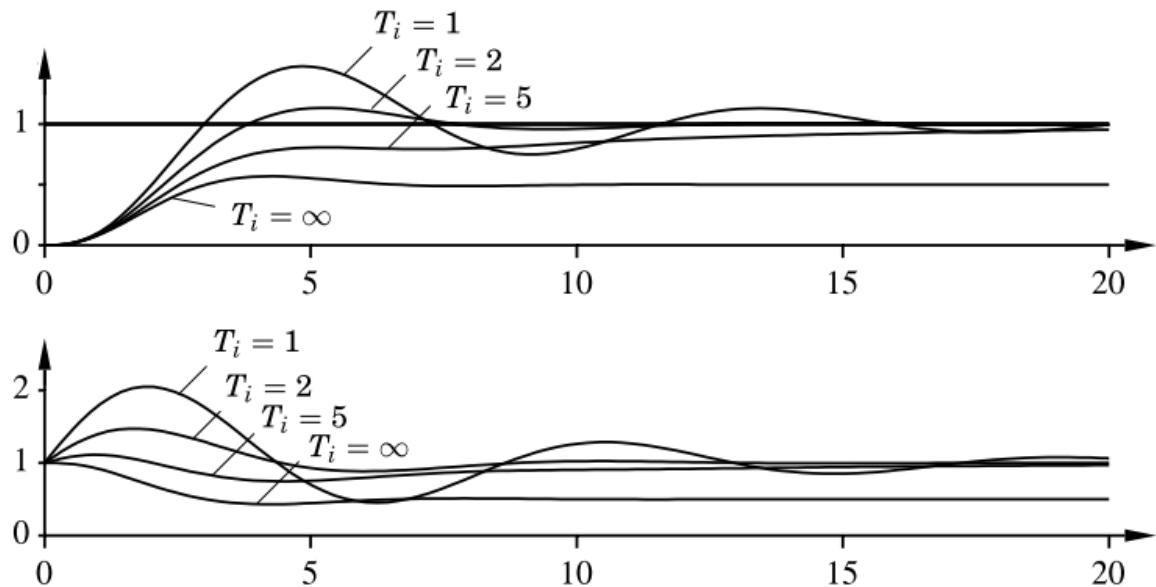


Figura 1.4: Simulació de un sistema enllaç tancat amb control proporcional i integratiu per a diferents valors del temps d'integració T_i . El primer diagrama representa la resposta del sistema y mentre que el segon mostra la variació del senyal de control u . La funció de transferència del procés és $P(s) = 1/(s + 1)^3$ i la senyal del set point és 1 (Knospe, 2006).

Acció derivativa (D) i controlador PD

La funció de l'acció derivativa és la de millorar l'estabilitat de la resposta del sistema.

Es pot entendre la inestabilitat a causa de la natura de l'equipament utilitzat. Un canvi en la variable de control no serà detectat instantàniament per l'equip, per tant el canvi en la variable del control es produirà tard per corregir l'error.

L'acció d'aquest controlador té un caràcter anticipatiu al error i només actua quan hi ha un canvi en el sistema. Per tant un controlador format únicament per l'acció D no tindria sentit ja que només actuaria en el instant en el qual es produeix un canvi.

L'acció ideal de un controlador derivatiu pot ser expressat com a:

$$u(t) = T_d \left(\frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.7)$$

On T_d és el temps derivatiu. La seva corresponent funció de transferència és

$$C(s) = T_d s \quad (1.8)$$

L'acció predictiva funciona extrapolant l'error en la tangent de la corba d'error tal i com es pot observar en la següent figura.

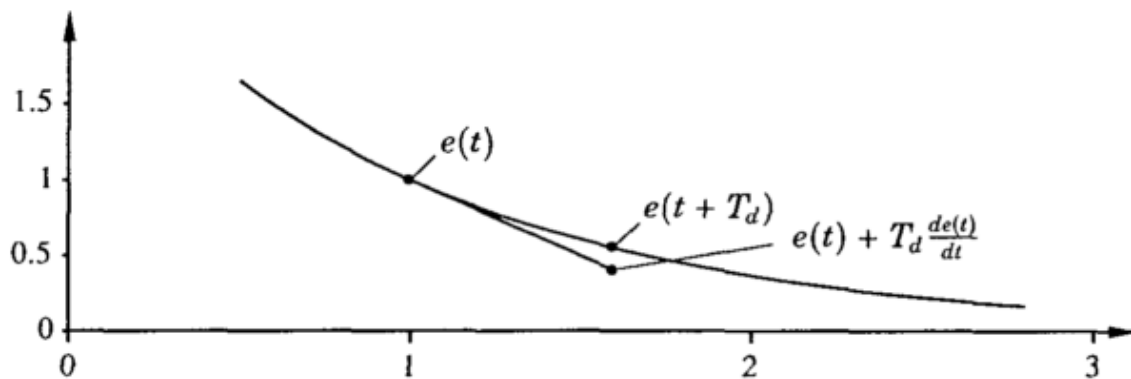


Figura 1.5: Representació de l'aproximació de l'error per l'acció derivativa mitjançant la extrapolació lineal (Astrom, 1995).

Cal notar que per T_d massa grans (en general més gran que una sisena part del període del sistema) l'acció derivativa es fa inefectiva. Les oscil·lacions generades en el senyal de control (així com en la resposta del sistema) disminueixen per temps derivatius majors tot i que com ja s'ha comentat quan superen una certa magnitud el control per efectivitat i es tornen a generar oscil·lacions.

Aquest comportament es veu demostrat en la Figura 1.6 amb l'exemple d'una simulació d'un control PID.

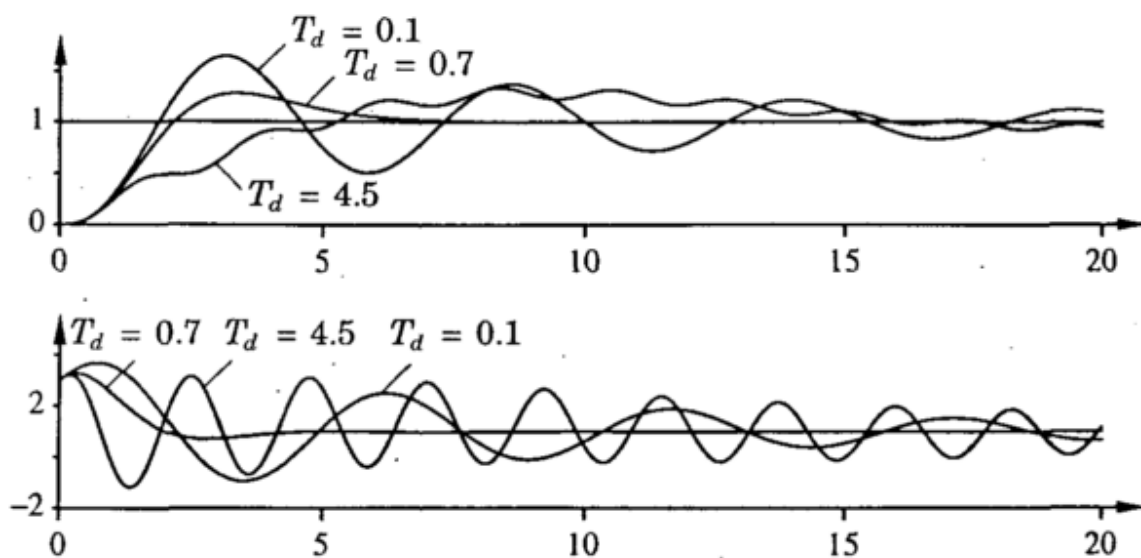


Figura 1.6: Simulació enllaç tancat de un control PID. La funció de transferència del sistema és $G(s) = (s + 1)^{-3}$, el guany K_p del control és 3, el temps d'integració és $T_i = 2$. El primer diagrama mostra la resposta del sistema y per a diferents T_d amb un set point de magnitud 1. El segon diagrama mostra la senyal de control u per als mateixos valors (Astrom, 1995).

El control PD neix d'afegir una acció proporcional a la derivativa.

Per tal de representar la funció de transferència d'un controlador PD ens fixarem en els dos primers termes de la sèrie de Taylor a un temps T_d .

$$e(t + T_d) = e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.9)$$

Afegint-hi una acció proporcional ens resulta:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.10)$$

Aquesta és l'expressió que defineix l'acció de control d'un controlador PD. El valor de control serà proporcional al error estimat al temps $t + T_d$.

Aquest controlador té l'avantatge sobre el proporcional pur de ser capaç d'anticipar-se a possibles canvis en l'error del sistema tot i així segueix presentant el problema de no ser capaç de corregir l'error de sistema generat per l'acció proporcional així com els inconvenients de l'acció derivativa.

Controlador PID

Un control PID ve donat per la combinació de les tres accions descrites anteriorment donant la següent funció de transferència.

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1.11)$$

Aquest controlador té les mateixes propietats que un PI però gracies a l'acció derivativa per a canvis grans en l'error té un temps de resposta i estabilització molt menor. Per tant per a sistemes amb variacions molt petites l'efecte derivatiu pot ser considerat negligible.

El desavantatge que presenta és la tendència a oscil·lar així com la dificultat afegida per al seu calibratge.

És el tipus de controlador més utilitzat tot i que existeixen nombroses variacions en la seva forma per tal d'ajustar-se millor a les necessitats de control.

1.2.4. Sintonia de controladors

Existeixen molts mètodes de sintonia de PID. La majoria dels reguladors PID emprats a la indústria tenen una opció d'auto-tuning en la qual, després d'un experiment de caracterització del sistema, calcula automàticament els valors per el PID.

La sintonia de PID és un dels aspectes més crítics a l'hora de dissenyar un control ja que d'aquests paràmetres dependrà la resposta del sistema, la seva rapidesa i robustesa.

En aquest apartat ens centrarem en les clàssiques tècniques empíriques descrites per Ziegler Nichols (1942) així com la tècnica del lloc geomètric de les arrels.

1.2.4.1. Disseny empíric, Ziegler Nichols

Les tècniques descrites per Ziegler Nichols al 1942 han sigut i segueixen sent el pilar de la sintonia de PID. Avui en dia hi segueixen havent moltes tècniques que es basen en elles o en són modificacions.

Mètode de resposta a entrada graó

El primer mètode empíric presentat per Ziegler Nichols és el de la resposta en llaç obert a una entrada graó amb la qual es determinaran dos paràmetres característics per la sintonia del PID.

Un cop obtinguda la corba de la resposta, gràficament es dibuixa una recta tangent al punt de màxim pendent de la corba. El punt on la recta ens talla amb l'eix d'abscisses determina el paràmetre L . El punt on la recta talla a l'eix de ordenades ens determina el paràmetre a .

Un exemple de la resolució gràfica pot ser mostrada en la següent imatge.

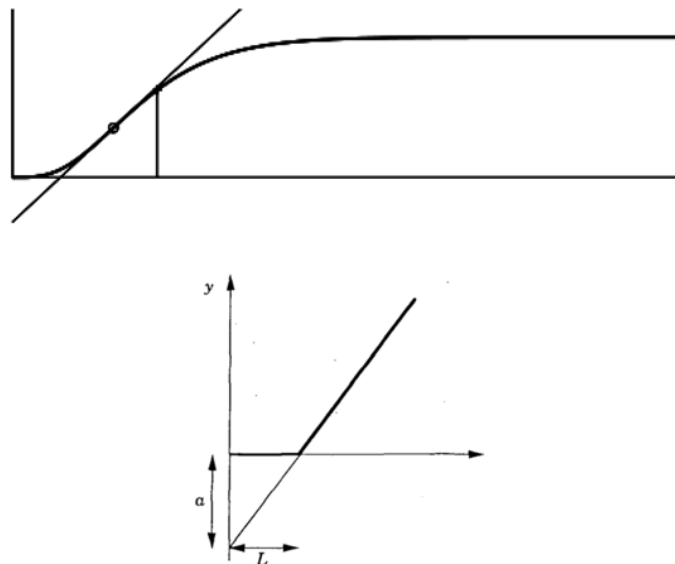


Figura 1.7: Exemple del mètode de resolució gràfic de Ziegler Nichols. En la primera figura es pot observar la corba de resposta del sistema en llaç obert a una entrada graó així com el dibuix de la recta tangent a el punt de màxim pendent de la corba. En la segona figura és mostra un exemple de

com determinar els paràmetres a i L mitjançant els punts de tall de la recta tangent amb els eixos de coordenades.

Un cop els paràmetres han sigut determinats es pot calcular els valors del PID seguint les normes de la Taula 1.1.

Taula 1.1: Paràmetres de control del PID obtinguts amb el mètode de resposta a entrada graó de Ziegler Nichols. Font: (Astrom, 1995).

Tipus de controlador	K_p	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4 \cdot L$
PI	$0,9 \cdot a$	$3 \cdot L$		$5,7 \cdot L$
PID	$1,2 \cdot a$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$	$3,4 \cdot L$

Alternativament aquets mateixos càlculs es poden fer amb el paràmetre T substituint l' a . En el següent gràfic es pot apreciar com es determina el paràmetre.

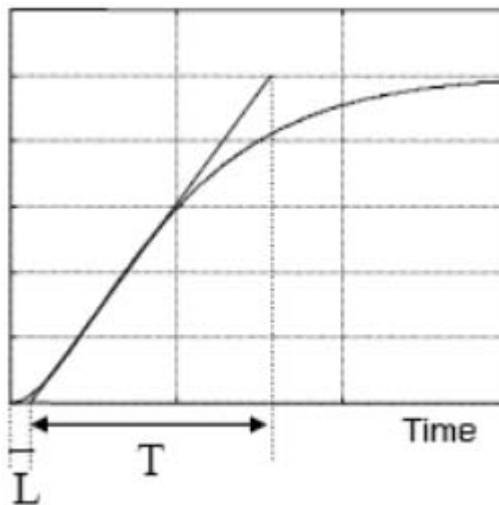


Figura 1.8: Determinació dels paràmetres T i L del mètode de resposta a entrada graó de Ziegler Nichols.

Amb la qual la taula per determinar els paràmetres dels controladors resulta:

Taula 1.2: Càlcul dels paràmetres PID per el mètode de resposta a una entrada graó de Ziegler Nichols utilitzant els paràmetres T i L .

Tipus de controlador	Kp	Ti	Td
P	T/L		
PI	$0,9 \cdot T/L$	$L/0,3$	
PID	$1,2 \cdot T/L$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$

Mètode de l'oscil·lació mantinguda

Es basa en la caracterització de la freqüència de resposta del procés dinàmic. Utilitzant la corba de Nyquist de la funció de transferència del procés es troba el punt de tall amb l'eix real negatiu.

Aquest punt ens determinarà la freqüència i el guany. Per determinar el punt es connectarà un controlador al procés en llaç tancat. Es donarà el valor següent per als paràmetres $T_i = \infty$ i $T_d = 0$ per tal d'obtenir un controlador proporcional pur. S'anirà augmentant el guany del controlador P fins a aconseguir que la resposta del procés comença a oscil·lar.

Al punt on tenim una oscil·lació amb amplitud constant és el que ens determinarà el guany crític K_c i el seu període T_c . Amb aquest dos valors seguin la Taula 1.3 es podran determinar els paràmetres dels controladors.

Taula 1.3: Càlcul dels paràmetres de un PID per el mètode de oscil·lació mantinguda. Font: (Astrom, 1995).

Tipus de controlador	Kp	Ti	Td
P	$0,5 \cdot K_c$		
PI	$0,4 \cdot K_c$	$0,8 \cdot T_c$	
PID	$0,6 \cdot K_c$	$0,5 \cdot T_c$	$0,125 \cdot T_c$

Cal tenir en compte que els equip sintonitzats seguint aquests dos mètodes proposats per Ziegler Nichols solen ser poc robustos i necessiten de una sintonització en fi per aconseguir un bon control.

Això es degut a que aquestes normes de sintonia es van fer amb un criteri de disseny de de un quart de amplitud d'atenuació. Cosa que implica que l'amplitud d'una oscil·lació s'ha de reduir a una quarta part en la durada de un període. Això correspon a sistemes de llaç tancat amb un factor d'esmoreïment d'aproximadament $\zeta = 0,2$, que és molt petit.

També cal notar que caracteritzar un sistema amb només dos paràmetres sol ser massa simplista. Tot i aquest inconvenients els mètodes de Ziegler Nichols son àmpliament utilitzats per la seva senzillesa i facilitat de comprensió.

1.2.4.2. Disseny analític, lloc geomètric de les arrels

El mètode del lloc geomètric de les arrels o “root locus” en anglès és un mètode clàssic d'anàlisi de sistemes lineals en laça tancat. En funció d'un paràmetre, en general un guany corresponent a un controlador de tipus proporcional, s'analitzaran les possibles arrels per a la funció de transferència en laça tancat avaluada.

Aquest mètode ens permet trobar els pols d'una funció de transferència en laça tancat en funció d'un guany k i a partir de la seva funció de transferència en laça oberta. És una eina molt útil per tal de valorar sistemes dinàmics lineals (SISO).

Els SISO son sistemes amb una sola entrada i una sola sortida.

Donat un sistema en laça oberta representat per la funció de transferència $G(s)$, el lloc geomètric representa en el pla S tots els possibles valors de les arrels de la funció característica del sistema en laça tancat definida com $1 + kG(s)$ quan k varia de 0 a ∞ . Un exemple, obtingut amb Matlab, es presenta en la Figura 1.9. En aquesta figura s'observa que les “x” blaves indiquen els pols del sistema en laça oberta (quan $k=0$) i les “o” vermelles mostren els zeros del sistema en laça oberta ($k = \infty$).

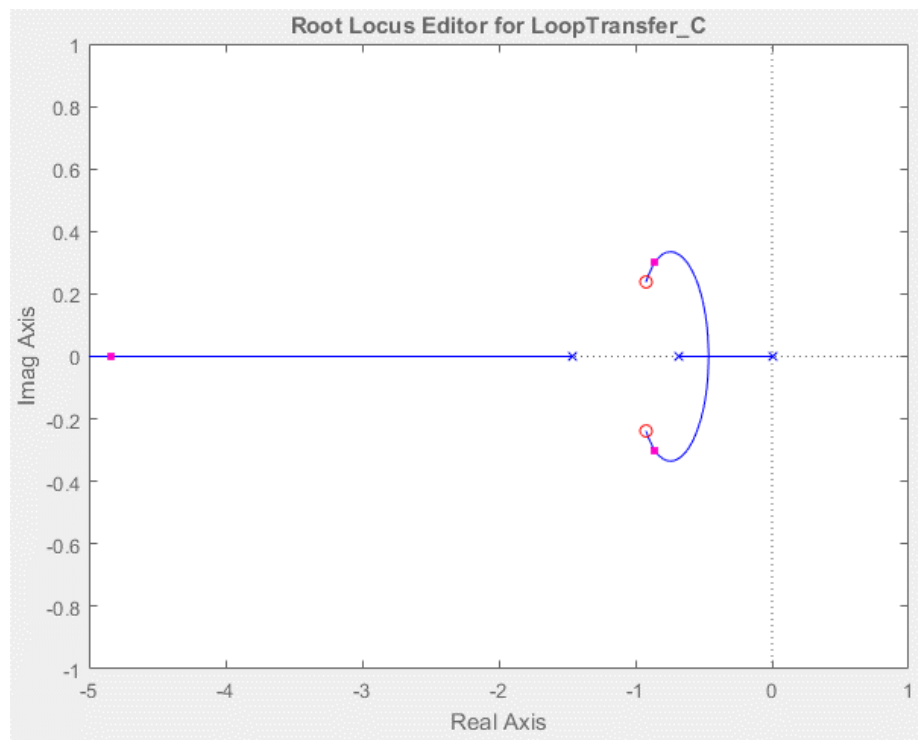


Figura 1.9: Exemple de l'aplicació del mètode i les arrels trobades per a una funció de transferència $G(s) = \left(k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}\right) / s$.

1.2.5. Modelització i simulació

Abans d'establir cap tipus de llei de control és molt recomanable establir un model matemàtic que ens defineixi com actua el sistema.

Entenem com ha model d'un sistema uns seguit d'equacions matemàtiques que defineixen com actua el sistema. Per tal d'establir-lo utilitzem eines matemàtiques com és ara lleis físiques, sistemes algebraics, les EDO etcètera.

El model és diferència del cas real en petits efectes físics depreciats, desviacions a causa de aproximacions numèriques (processos iteratius, arrodoniments..) però a diferència del cas d'estudi empíric l'escala de la instal·lació no és un problema.

Gràcies a l'elaboració d'un model matemàtic podem utilitzar la simulació de processos.

L'objectiu d'una simulació és el de desenvolupar un mètode per tal de predir el comportament del sistema. Això permet optimitzar el sistema o dissenyar-lo sense la necessitat de construir una planta pilot o la de fer múltiples anàlisis experimentals. Lògicament aquest fet fa de la simulació una eina molt útil quan el sistema a dissenyar podria resultar perillós o simplement car de construir/desenvolupar de manera física.

En la Figura 1.10 podem observar un diagrama del procés de realització de una modelització i simulació de sistemes.

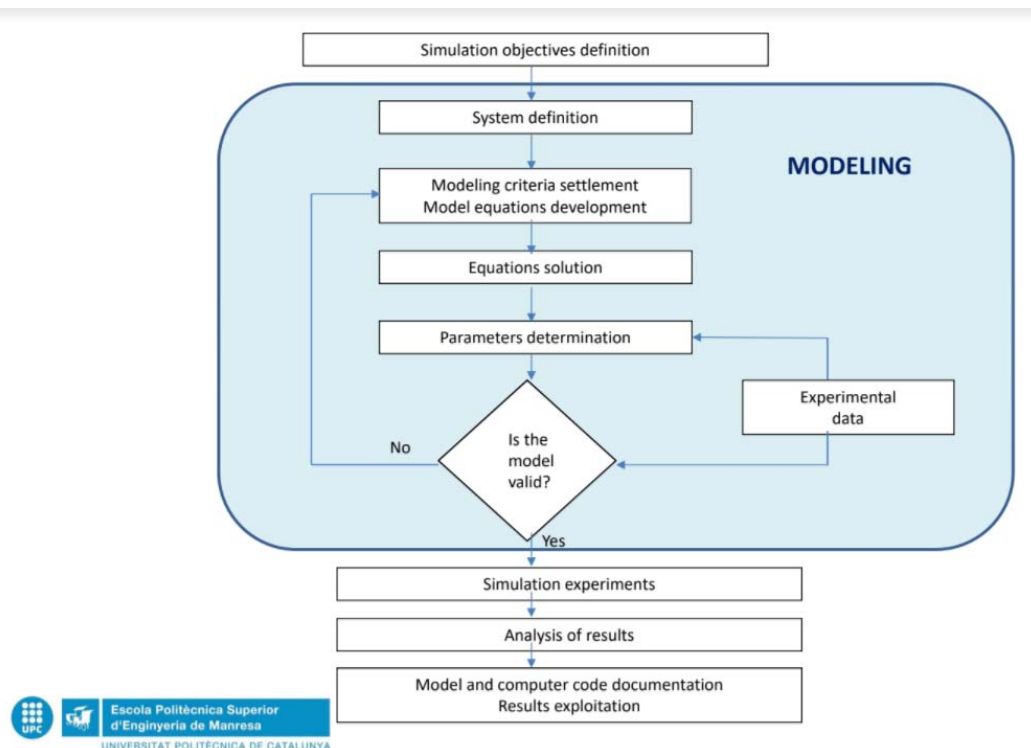


Figura 1.10: Estructura lògica a seguir per a la realització d'un model i la seva conseqüent simulació. Font: Noguera, X.G. *Chemical processes simulation and control*. 2015, UPC, EPSEM.

Un altre dels grans avantatges de la simulació és la capacitat d'analitzar de manera molt més ràpida i barata que els sistemes experimentals la viabilitat de diferents configuracions per a un sistema.

Aquest model de simulació poden ser models estàtics, utilitzats en el disseny en estat estacionari, i models dinàmics com ara els processos de control.

Per tal de realitzar els càlculs que poden arribar a ser extremadament complexos s'ha desenvolupat programari especialitzat. Per a l'elaboració d'aquest treball s'utilitzarà el programa Matlab juntament amb l'eina Simulink per tal de resoldre l'apartat de càlcul i simulació

1.2.5.1. Matlab i Simulink

El programari Matlab és un software matemàtic amb llenguatge de programació propi (M) disponibles per a diferents plataformes (Windows, Unix, Mac Os X y Linux) desenvolupat per la companyia Math Works.

Dins de les seves funcions bàsiques s'inclouen el càlcul amb matrius, definició i representació de funcions i dades, implementació d'algoritmes, creació de interfícies

d'usuari i la interacció amb d'altres programes que utilitzen diferents llenguatges de programació.

El programa inclou una gran llibreria de funcions per a un ampli ventall d'operacions. Podem trobar documentació explicativa amb la seva definició bàsica, opcions i exemples de cada una d'elles dins del "*Help*" del programa.

Un dels paquets d'eines del programa és el Simulink. Aquest programa té la capacitat de representació de models i sistemes així com la seva simulació. Simulink treballa en l'entorn Matlab.

Aquest programari es àmpliament utilitzat tant en l'àmbit acadèmic com professional en l'enginyeria electrònica, de control i robòtica entre d'altres.

A continuació es descriu com treballar amb dues aplicacions de l'entorn matlab utilitzades per al desenvolupament del treball.

Control System Designer

Aquesta aplicació permet dissenyar controladors per a sistemes d'una entrada i una sortida (SISO). El disseny del controlador es pot fer emprant diferents tècniques gràfiques: lloc geomètric dels arrels (rlocus), mètode interactiu de Bode i editor gràfic de Nichols per modificar els pols, zeros i guany del control entre d'altres. Per a l'aplicació en el treball utilitzarem el lloc geomètric de les arrels ("rlocus").

La comanda per tal de iniciar l'aplicació s'escriu tal i com es pot observar en la Figura 1.11. Cal tenir en compte que el segon argument és la funció de transferència del sistema prèviament definida en entorn Matlab.

```
>> controlSystemDesigner('rlocus',G_p1)
```

Figura 1.11: Comanda per cridar l'aplicació "Control System Designer". El primer terme 'rlocus' ens obre l'eina per a realitzar l'assignació de pols mentre que en el segon hi hem de posar el nom assignat a la funció de transferència en llaç obert del nostre sistema.

Un cop dins l'aplicació veiem dues pestanyes. La primera "*Root Locus Editor for loop Transfer*" ens representa els pols i els zeros de la funció de transferència en el pla S. La segona "*IO_Transfer_r2y:step*" ens mostra la resposta del sistema.

Cal tenir en compte que un sistema és estable sempre que tots els seus pols es trobin situats en el semipla esquerra del pla S.

Per tal d'afegir zeros reals a el pla de les S farem clic dret del ratolí sobre el gràfic que ens mostra els pols i els zeros de la funció i seleccionarem “Add Pole/Zero>Real Zero” tal i com es mostra en la Figura 1.12.

Un cop afegit el zero real podrem canviar el valor dels pols de la funció en llaç tancat (marcats amb un punt vermell a la gràfica) i el mateix zero per veure quin resultat té sobre la resposta del sistema desplaçant-los per la gràfica.

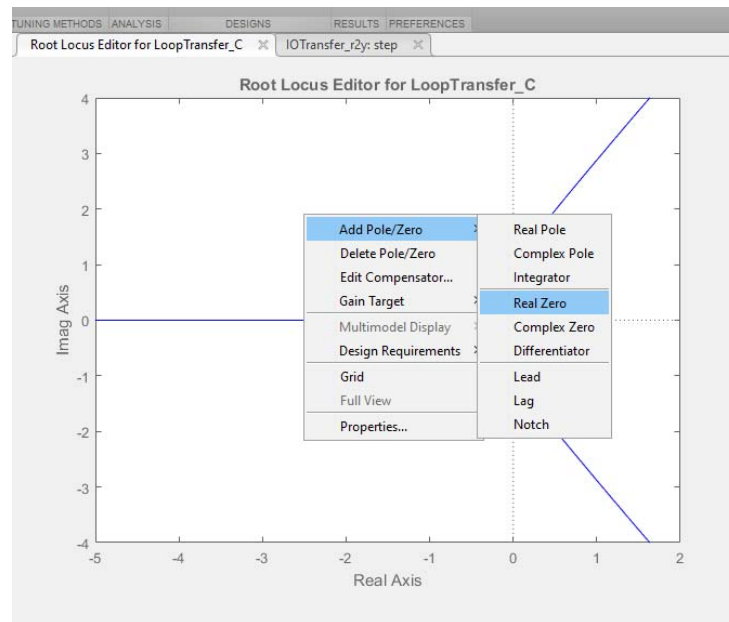


Figura 1.12: Per tal de afegir zeros i pols a el pla ho farem a través del menú que es desplega després de fer clic dret sobre la gràfica.

Un cop aconseguim una resposta per al sistema que considerem que s'ajusta a les nostres necessitats podrem veure el polinomi del controlador a la finestra “Preview” si seleccionem el controlador C dins la finestra “Controllers and Fixed Blocks”.

Es pot consultar la resposta del sistema en llaç tancat consultant la pestanya “IO_Transfer_r2y:step” tal i com es mostra en la Figura 1.13.

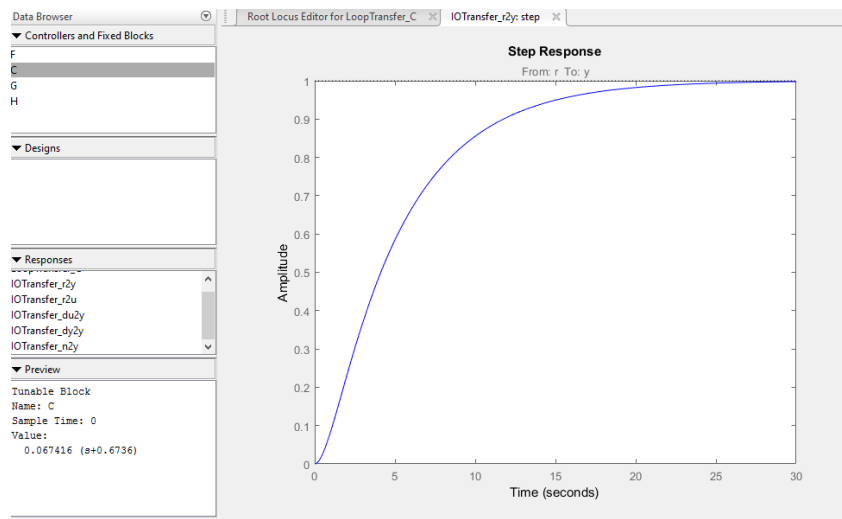


Figura 1.13: Exemple de resposta de un sistema simulada amb l'aplicació “*Controllers and Fixed Blocks*” de Matlab.

Per tal d'assignar una parella de zeros complexos es farà clic en la gràfica de la pestanya “*Root Locus Editor for loop Transfer*”, al desplegable seleccionarem: “*Add Pole/Zero>Real Zero*” tal i com es mostra en la Figura 1.14.

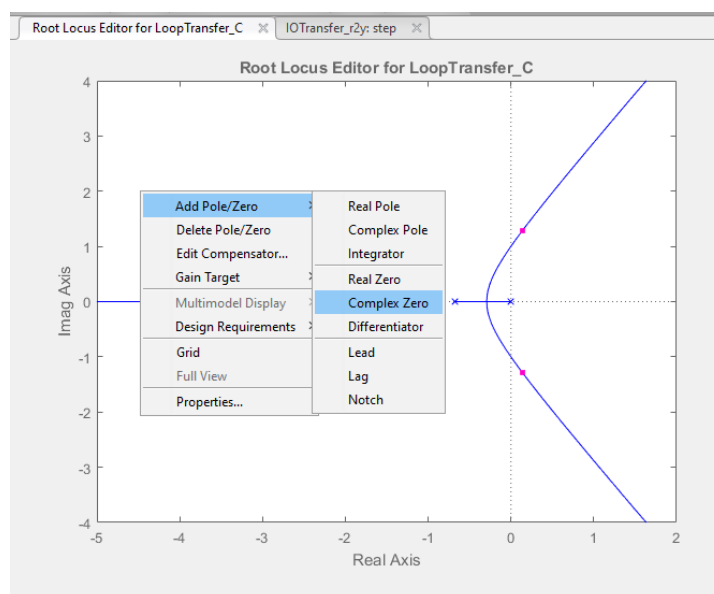


Figura 1.14: Selecció d'un zero complex en el gràfic de pols i zeros de la funció de transferència.

System identification

L'aplicació “*System identification*” ens permet identificar models dinàmics a partir de dades mesurades d'entrada i sortida. Es poden estimar models tan lineals com no lineals i comparar la resposta dels diferents models contrastada amb l'experimental.

Aquesta aplicació permet:

- Importar, representar gràficament i pre-processar dades mesurades d'entrada i sortida.
- Estimar models lineals com ara funcions de transferència, models de processos, models polinòmics.
- Validar model estimats fent servir conjunts de dades independents
- Exportar els models estimats al “workspace” de Matlab.

Aquesta aplicació s'ha utilitzat en l'apartat de discussió de resultats per tal de contrastar els resultats obtinguts per la simulació del model plantejat amb una eina més fiable i complexa com es aquesta aplicació.

Per al seu funcionament requereix de la definició prèvia de les variables d'entrada i sortida en el “workspace” de Matlab. Un exemple d'aquesta definició la a partir de fitxers de dades .txt la podeu trobar en la Figura 1.15.

```
dades4p=load('Pressió_V4_P.txt');
dades5p=load('Pressió_V5_P.txt');
dades6p=load('Pressió_V6_P.txt');
dades7p=load('Pressió_V7_P.txt');
dades8p=load('Pressió_V8_P.txt');

t4p=dades4p(:,1);% mostres
u4p=dades4p(:,2); % u és l'acció de control
x4p=dades4p(:,3);% x és la lectura del sensor

t5p=dades5p(:,1);
u5p=dades5p(:,2);
x5p=dades5p(:,3);

t6p=dades6p(:,1);
u6p=dades6p(:,2);
x6p=dades6p(:,3);

t7p=dades7p(:,1);
u7p=dades7p(:,2);
x7p=dades7p(:,3);

t8p=dades8p(:,1);
u8p=dades8p(:,2);
x8p=dades8p(:,3);

y4SI=x4p(1:300);
y5SI=x5p(1:300);
y6SI=x6p(1:300);
y7SI=x7p(1:300);
y8SI=x8p(1:300);

u4SI=u4p(1:300);
u5SI=u5p(1:300);
u6SI=u6p(1:300);
u7SI=u7p(1:300);
u8SI=u8p(1:300);
```

Figura 1.15: Exemple d'assignació de dades per al seu anàlisi amb l'aplicació “System identification”. Cal analitzar la part transitòria de la resposta. En aquest cas coincidiria amb les 300 primeres mostres.

Per tal d'obrir l'aplicació escriurem la comanda >>systemIdentification (pitjarem “Enter”) a la finestra de comandes de Matlab. La pàgina principal de l'aplicació es mostra en la Figura 1.16.

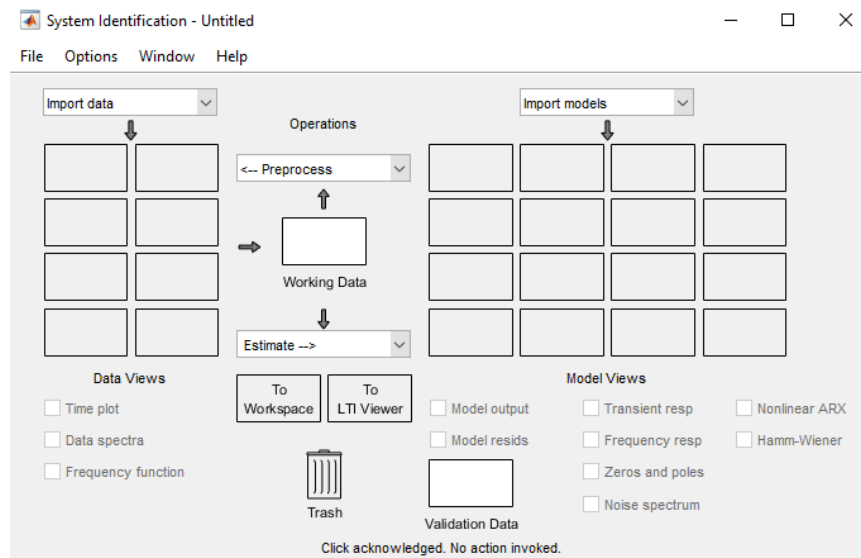


Figura 1.16: Finestra principal de l'aplicació. Les caselles “Model output i Timeplot” ens permeten visualitzar gràficament l'ajust del model o el comportament de les dades seleccionades.

Per importar dades anirem al desplegable de “Import data” i seleccionarem l'opció “Time domain data”. Se'ns desplegarà un menú com el que es veu en la Figura 1.17 on assignarem l'entrada i sortida prèviament definides a Matlab, un nom per al conjunt de dades, un temps d'entrada i el temps de mostreig. Quan ho tinguem emplenat clicarem “Import”.

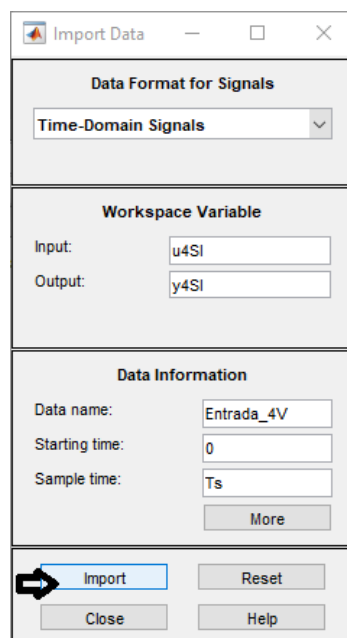


Figura 1.17: Menú per importar dades emplenat amb les variables definides prèviament com ha exemple.

Un cop importades les dades podrem fer-ne l'estimació desplegant el menú "Estimate -->" i prement "Process Models". Aquesta opció ens obrirà una finestra (Figura 1.18) que ens permetrà seleccionar el tipus de model al que voleu estimar.

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>		Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 1.5]

Figura 1.18: Finestra de l'opció de process Models.

Un cop creat al model podem fer-li doble clic a la pagina principal perquè ens obri una finestra amb informació addicional.

2. OBJECTIUS

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar les dues plantes pilot amb les quals es treballarà amb la intenció de dissenyar una pràctica docent per als estudiants. Les plantes són exemples senzills de processos molt utilitzats en la indústria química com són el control de nivell i pressió.

Amb aquesta idea en ment es redactarà un guió de pràctiques.

Per a les dues plantes es plantejarà el model matemàtic que les defineix. El model serà definit amb les equacions físiques que el defineixen com per exemple balanços d'energia en la forma de l'equació de Bernuilli. En cas de no poder resoldre el model per aquest mètode es calcularà un model tipus caixa negra emprant tècniques estadístiques.

Un cop plantejat el model teòric s'ajustaran les possibles constants característiques del sistema que s'hagin pogut obtenir experimentalment amb l'ajuda de l'eina de càlcul Matlab.

Mitjançant el programa Simulink es crearà una simulació que representi el comportament de les dues estacions.

Amb l'ajuda d'aquesta simulació i tècniques empíriques i analítiques de sintonia de controladors s'implementarà un control provant diferents estructures per als controladors.

3. ANTECEDENTS

Les estacions amb les quals s'ha desenvolupat el projecte van ser creades per un ús acadèmic per l'empresa Festo. Inclouen una sèrie de manuals on podem trobar informació sobre els temes següents.

- Planificació de projectes de control
- Muntatge i configuració de les estacions
- Programació de les estacions amb "InTouch"
- Operació de la planta
- Manteniment
- Exercicis proposats

La documentació aportada per aquets manuals ha sigut el punt de partida del treball. Els exercicis proposats en els manuals han servit d'inspiració per a el guió de pràctiques proposat. Tot i així val la pena mencionar que estaven proposats amb la idea de que la persona que realitza la pràctica tingues coneixements propis de l'enginyeria electrònica i de control més que de la branca d'enginyeria química.

El guió final de pràctiques és propi i original així com els exercicis que es proposen.

Cal mencionar dos treballs de fi de grau realitzat sobre les mateixes estacions previs al meu.

El primer", que data del 2005, tenia com a objectiu desenvolupar un entorn gràfic amb el programari "InTouch" que facilites el control i la supervisió de les plantes així com un manual per al usuari del anteriorment esmentat entorn gràfic.

Posava especial atenció en la comunicació de les estacions amb un ordinador remot per tal de comunicar l'entorn gràfic (situat en l'ordinador) amb el control de les estacions.

En l'estat actual dels equips no s'ha pogut fet servir l'entorn gràfic que es va desenvolupar en el projecte esmentat. Tot i així ha sigut un punt de partida per a la comprensió de el funcionament de les estacions així com la seva configuració per a la comunicació de dades amb un equip remot.

El segon treball es titula "Ús de telèfons intel·ligents en la supervisió de processos" realitzat per en Max Van Der Lubbe Sanjuan a l'any 2015. Tenia com a objectius el desenvolupament de un programari que possibilita la supervisió del sistema de control fent us dels telèfons intel·ligents.

Aquest segon treball s'allunyava més de la temàtica del projecte realitzat ja que es centrava en la programació de l'eina i l'app mòbil per comunicar-se amb el sistema de control i el control en si quedava rellevat a un segon pla.

4. DESCRIPCIÓ MATERIALS I MÈTODES

4.1. Estacions de treball

4.1.1. Maquetes utilitzades

La maqueta amb la que es treballarà és de la marca Festo. Originalment estava formada per cinc estacions de treball que estaven pensades per ser una introducció i pràctica didàctica de cara a l'enginyeria de control i automatització.

Aquesta maqueta ve complementada amb una sèrie de dossiers en anglès i alemany amb fonaments teòrics d'enginyeria de control així com especificacions tècniques de les estacions.

Per a aquest treball només treballarem amb l'estació de control de nivell i l'estació de control de pressió ja que en el moment de la seva realització eren les dues úniques estacions que estaven a punt per ser utilitzades.

4.1.2. Descripció dels components de les estacions

Per a més informació sobre els components es pot consultar els manuals de Festo sobre les estacions. Tota la informació present en aquest apartat ha sigut extreta dels “*data sheets*” dels manuals.

4.1.2.1. Tancs

La funció que compleixen els tancs en les estacions és la de fer de recipients per al fluid que circula en elles, l'aigua.

Les dimensions exteriors del tanc són de 240 mm d'amplada per 190 mm de fondària i 380 mm d'altura. Tenen una tapa en la part superior de les mateixes dimensions de la base que pot ser retirada per tal d'omplir-los manualment o fer qualsevol altre tipus de operació.

En la cara frontal del tanc hi ha una escala mil·limetrada amb un rang de 300 mm així com una forat per a la connexió d'una unitat per regular la temperatura del fluid.



Figura 4.1: Tanc de l'estació de nivell, amb dues connexions de tubs utilitzades.

Disposen de 8 punts de connexió amb conductes en la placa frontal, sis en la part inferior i dos en la superior, i un novè situat en la tapa per tal de permetre diferents configuracions. Estan fets de un material plàstic transparent.

Tots els tancs de les estacions són iguals en dimensions i construcció.

4.1.2.2. Conductes

Fets de un material plàstic, tenen un diàmetre extern de 15 mm i els elements connectors venen dotats de un sistema fàcil de connexió que evita fuites en el sistema.

Es disposa de diversos elements individuals per tal de configurar les connexions:

- Elements rectes de diverses mides
- Vàlvules manuals
- Connector de 90°
- Connexió T de 90°
- Taps pels tubs

El procés d'assemblatge és manual i no requereix l'ús d'eines especialitzades gracies al anteriorment esmentat sistema de connexió del elements individuals.



Fitting

Figura 4.2: Imatges dels colzes, T i vàlvules manuals.

4.1.2.3. Sensors

Sensor analògic ultrasònic

La funció del sensor és mesurar la distància a un objecte i transformar-la en un senyal elèctric de magnitud proporcional a la mateixa.

El principi de funcionament dels sensors ultrasònics es basa en la detecció d'ones acústiques que són reflectides per a un objecte.

Un generador acústic s'activa durant un breu instant de temps emetent un impuls ultrasònic, inaudible per a l'oïda humana, que seguidament xoca amb la superfície d'un objecte. L'eco del so es detecta per al sensor. En general el medi de conducció de la ona és l'aire.

Dins el rang de mesura la senyal generada per l'eco de l'ona és proporcional a la seva durada.



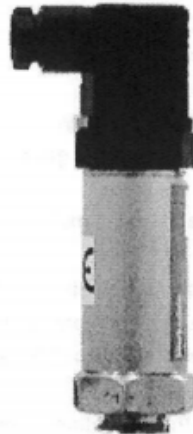
Analog ultrasonic sensor

Figura 4.3: Imatge d'un sensor analògic ultrasònic

Sensor analògic de pressió pietzoresistiu

La funció del sensor piezoresistiu és mesurar amb exactitud la magnitud de la pressió, així com les seves variacions, del espai on es troba situat. Així ens aportarà una senyal de magnitud proporcional a la pressió mesurada.

El seu funcionament es basa en l'efecte piezoresistiu. Efecte per el qual un material varia la seva resistència al pas del corrent en funció de la deformació provocada per la pressió en, per el cas del sensor, una secció feta de semiconductors.



Analog pressure sensor

Figura 4.4: Exemple de sensor analògic de pressió.

S'utilitzen semiconductors per la seva major sensibilitat a l'efecte en comparació al metall. L'augment de l'efecte és de un factor de entre 10 i 100 vegades més gran.

Cal notar que són sensibles als canvis de temperatura per tant solen anar amb un compensador incorporat.

Per el cas del sensor que s'utilitza pel projecte la seva corba característica és la mostrada en la Figura 4.5.

Characteristic curve

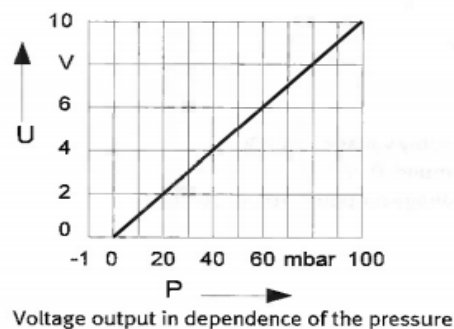


Figura 4.5: Corba característica pel sensor de pressió utilitzat en les maquetes.

4.1.2.4. Tanc pressuritzat

La funció d'aquest tanc és servir com a recipient per a un medi pressuritzat. En el cas de la estació de pressió aquest medi consisteix tant d'aire com d'aigua.

El volum efectiu del recipient és de dos litres. Cal notar que utilitzant-lo en l'estació de pressió la màxima pressió operativa no pot superar els 0,5 bar.

4.1.2.5. Vàlvules automàtiques

Vàlvula proporcional

La funció de la vàlvula analògica proporcional és la de impedir o facilitar el pas de corrent a través de la mateixa operant de manera remota. És utilitzada en sistemes de control per tal de regular el seu pas en funció de la senyal que li es aplicada.

Quan la vàlvula rep un impuls el pistó que bloqueja el pas s'aixeca i permet el pas del fluid. Un cop la vàlvula para de rebre energia el pistó recupera la seva posició original per via de una molla tornant a obstruir el pas.

Per tant l'estat per defecte de la vàlvula és tancat. Es pot observar la vàlvula utilitzada en les estacions en la *Figura 4.6*.

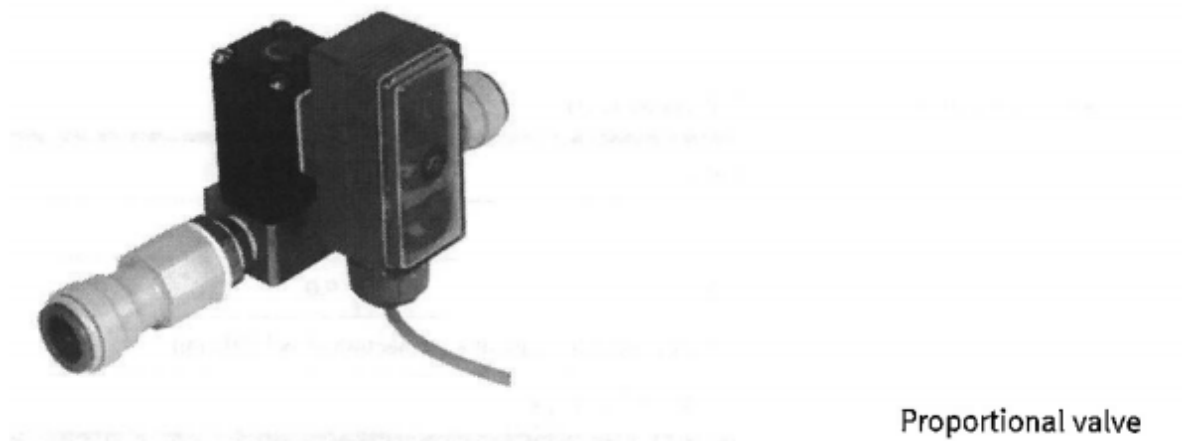


Figura 4.6: Vàlvula proporcional emprada en la construcció de l'estació.

4.1.2.6. Bomba

La funció de les bombes instal·lades en les diferents estacions és la de impulsar l'aigua a través de les mateixes. Addicionalment, en algunes estacions, el voltatge aplicat a la bomba serà el paràmetre sobre el qual s'actuarà quan es vulgui regular la resposta de l'estació.

Per exemple en el cas de l'estació de nivell s'actuarà sobre la bomba per tal de obtenir una alçada d'aigua determinada dins el tanc.

La bomba és de la marca *Johonson Pump* i el seu model és el CM30P7-1. La mateixa bomba es utilitza per a totes les estacions.

En la següent *Figura 4.7* es poden observar les diferents parts per les quals està construïda.

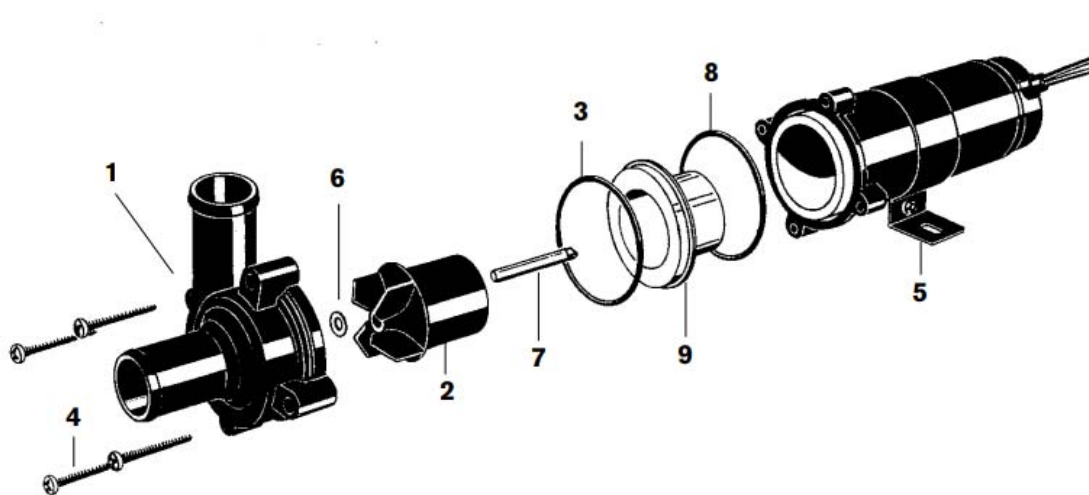


Figura 4.7: Esquema dels components de la bomba CM30PT-1 de Johnson Pump

1. Cos, diàmetre de 20mm
2. Turbina
3. Segellat "O-ring"
4. Cargols
5. Fixació del motor
6. Volanderes de desgast
7. Eix
8. Juntres
9. Caixa del imant

El motor de la bomba pot treballar a 12V i 24V.

En la següent taula es pot observar una relació de pressió generada així com corrent a diferents amperatges.

Taula 4.1: Corba de la bomba proporcionada per el fabricant (Manuals Festo)

Pressió (bar)	Flow(l/min)	Amperatge (12V)	Amperatge(24V)
0,1	26	2,2	1,1
0,2	19,5	2	1
0,3	9	1,7	0,75

S'ha d'evitar l'operació de la bomba sense fluid dins seus ja que li és molt perjudicial. En períodes curts d'operació no passa res però si la operació en sec dura més de 30 minuts la bomba quedarà inservible.

Aquest model en concret de bomba es sol utilitzar per a fer circular aigua o ve anticongelant en cotxes, vaixells i d'altres vehicles.

4.2. Estació de control de nivell

Els principals elements de la estació de control de nivell són:

- Sensor analògic ultrasònic
- Bomba (P101)
- Controlador del motor per a la bomba
- Tancs (B101 i B102)
- Sistema de conductes, inclou vàlvules manuals

La funció de la estació és regular el nivell d'aigua del tanc B102 mitjançant l'acció del sensor que ens proporcionarà un valor de 0 a 10. Sent 10 el tanc buit i 0 completament ple.

El sistema de control de nivell consta d'un circuit tancat amb dos tancs connectats (Figura 4.8) .

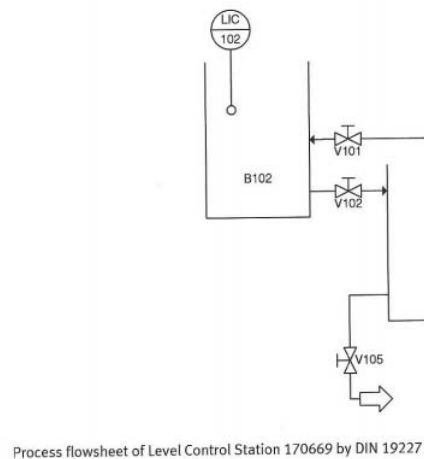


Figura 4.8: Esquema de la estació de nivell (Font: FESTO Control System Manual A pàg. 18)

L'aigua és impulsada des del tanc inferior (B101) al tanc superior (B102) per una bomba (P101) a través d'un conducte el qual pot ser limitat mitjançant l'acció d'una vàlvula manual (V101). Aquest corrent es denominarà com a corrent d'entrada o q_i .

Des del tanc B102 l'aigua retorna lliurement al B101 a través d'un conducte del qual podem variar la seva resistència mitjançant una vàlvula manual (V102). Aquest segon corrent serà anomenat corrent de sortida o q_o .

Es disposa d'un sensor de nivell (LIC/102) ubicat en el tanc B102 per tal de realitzar aquest control.

La vàlvula manual V105 serveix per a drenar el tanc B101 de l'aigua i en general romandrà tancada.

Podem observar una imatge de la estació en la Figura 4.10.

Operació

Per tal d'operar amb aquesta estació es mantindran les vàlvules manuals V101 i V102 obertes tal i com es mostra en la Figura 4.9.

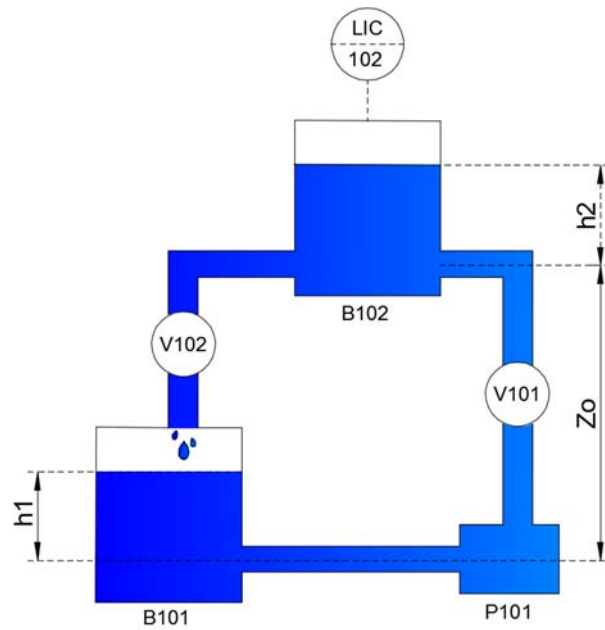


Figura 4.9: Esquema de l'operació de l'estació de nivell

La vàlvula V105 ha d'estar tancada en tot moment ja que serveix per a drenar l'estació i interferiria en el seu correcte funcionament.

L'actuador sobre el que nosaltres aplicarem la nostra entrada en aquest cas és la bomba P101, per tant s'haurà de modelitzar el nivell de l'aigua en l'esmentat tanc en funció de l'acció de la bomba.



Figura 4.10: Foto de l'estació de control de nivell

4.3. Estació de pressió

Els principals elements de la estació de pressió són:

- Sensor de pressió, piezoresistiu (PIC/303)
- Bomba (P301)
- Motor controlador per a la bomba
- Vàlvula proporcional amb mòdul de control electrònic (V306)
- Tanc de fluid (B301)
- Tanc pressuritzat (B303)
- Sistema de canonades

En aquesta estació la variable a controlar serà la pressió dins el tanc B303. Aquesta pressió és mesurada gràcies a l'acció del sensor situat en el mateix tanc.

Aquesta mesura és donada en forma de valor que oscil·larà entre 0 i 10. La funció del control serà mantenir la pressió a el nivell desitjat durant l'operació en el cas que apareguin distorsions.

Com es pot observar en la Figura 4.11 la bomba P301 impulsa l'aigua a través del sistema de canonades fins al tanc pressuritzat B303 on la pressió és mesurada. Per tal de regular aquest flux hi ha la vàlvula manual V303, i la vàlvula proporcional V306.

L'aigua pot retornar al tanc B301 a través de la canonada regulada per la vàlvula manual V309.

La vàlvula V307 ens permet l'entrada i sortida d'aire al tanc pressuritzat B303.

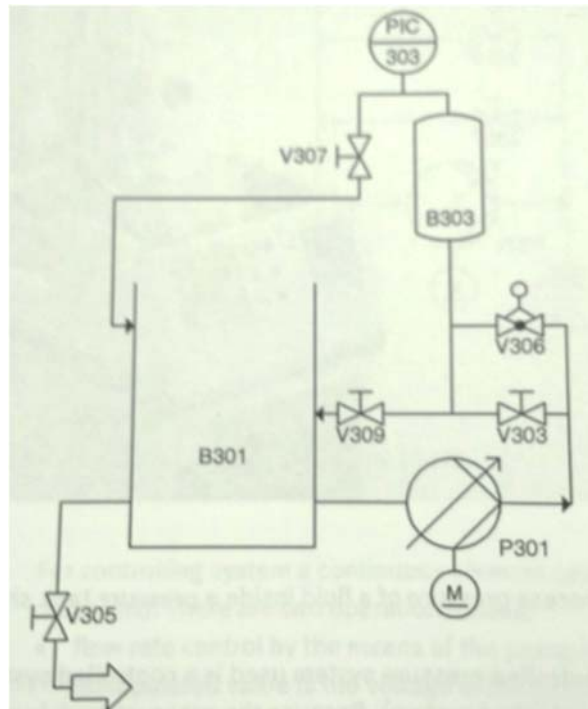


Figura 4.11: Esquema de l'estació (Font: FESTO Control System Manual A pàg. 22)

Operació

Per operar amb aquesta estació es mantindran les vàlvules manuals V307 i V309 tancades per tal de crear estanqueïtat en el tanc B303. Aquest fet permetrà, amb l'acció de la bomba P301, augmentar o disminuir la pressió, variable que serà controlada.

Amb la configuració d'aquesta estació es pot fer el control de la pressió de dues maneres:

- Controlant la restricció de la vàlvula proporcional mitjançant el voltatge aplicat a la mateixa. En aquest cas el voltatge aplicat a la bomba ha de ser un valor fixe.
- Controlar la pressió mitjançant l'acció de la bomba P103. La variable a manipular és el voltatge que és aplicat a la bomba que determina la seva velocitat de revolució.

En el nostre cas s'operarà mitjançant l'acció de la bomba degut a l'estat actual de l'estació que no permet fer el control amb la vàlvula proporcional.

La vàlvula manual V303 es mantindrà oberta per permetre el pas de l'aigua cap al tanc pressuritzat B303. En cas que s'utilitzés la vàlvula V306 per al control la V303 romandria tancada.

Per des pressuritzar o buidar el tanc B303 d'aigua s'obriran les vàlvules V307 i V309.

Es pot observar un esquema de com opera l'estació en la Figura 4.12, on es mostra la configuració de les vàlvules (en vermelles les que estan en posició tancada). És important

notar que per a un funcionament òptim del sistema es recomana que el nivell d'aigua del tanc B301 sigui superior al de el tanc B303 un cop s'ha arribat a l'estat estacionari.

L'objectiu de l'estació és el de controlar la pressió dins el tanc pressuritzat mitjançant l'acció de la bomba

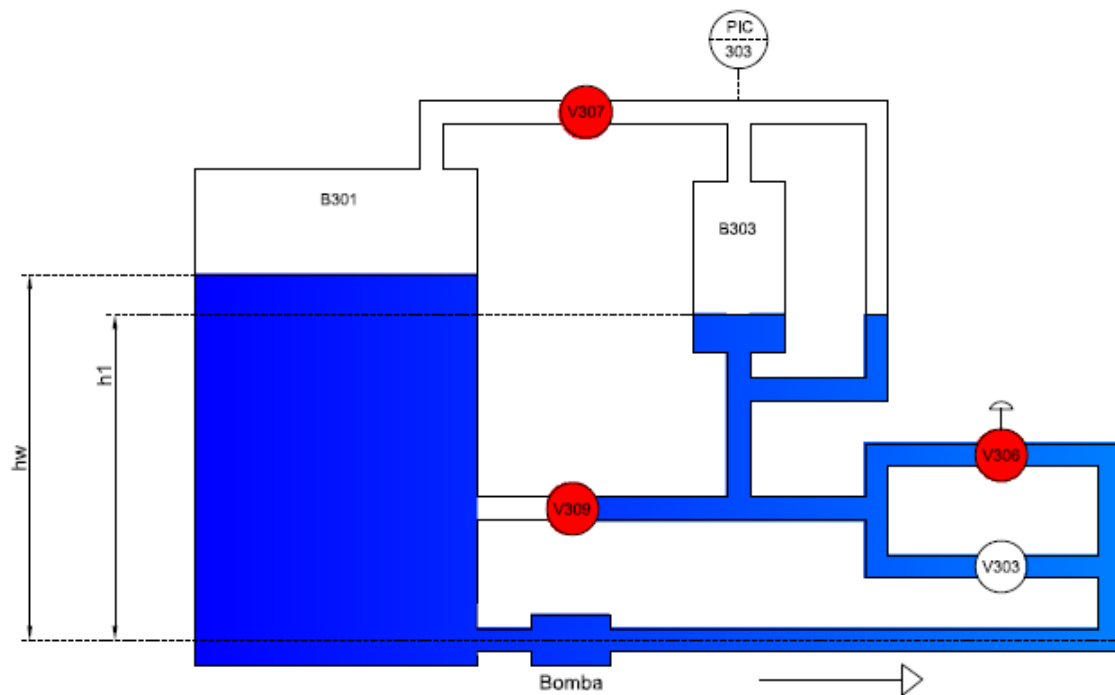


Figura 4.12: Operació de l'estació de pressió (propi)

5. RESULTATS

5.1. Models matemàtics

A continuació es descriuran els models matemàtics proposats per a cada una de les estacions treballades així com el procés que s'ha seguit per tal d'obtenir-los.

Es plantejarà diverses lleis (físiques) per tal de realitzar la modelització discutint-ne la viabilitat de cadascuna.

5.1.1. Estació de nivell

Per tal de realitzar el model matemàtic de l'estació ens fixarem el volum d'aigua que hi haurà en el segon tanc (B102) que és el que s'ha de controlar.

L'increment de volum en el tanc pot ser expressat plantejant el balanç màssic del sistema. En el cas del tanc B102, l'equació a plantejar és la descrita a **(5.1)**.

$$\frac{dV_2}{dt} = q_i(t) - q_o(t) \quad (5.1)$$

On V_2 és el volum ocupat per l'aigua en m^3 , $q_i(t)$ és el corrent d'entrada al tanc en m^3/s i $q_o(t)$ és el corrent de sortida o retorn en m^3/s . Tenint en compte que el volum del tanc es pot expressar com $V = A \cdot h$, l'equació **(5.2)** queda:

$$A \cdot \frac{dh_2}{dt} = q_i(t) - q_o(t) \quad (5.2)$$

La modelització del sistema serà dividida en dues parts corresponent els dos cabals que s'estableixen en ella. El model del corrent de entrada al tanc superior (B102) i el del retorn d'aquest mateix tanc.

Per tal de modelar l'estació s'utilitzarà el balanç energètic de la mateixa mitjançant l'equació de Bernoulli per a fluids reals. Els punts on es planteja el balanç són representats en la Figura 5.1.

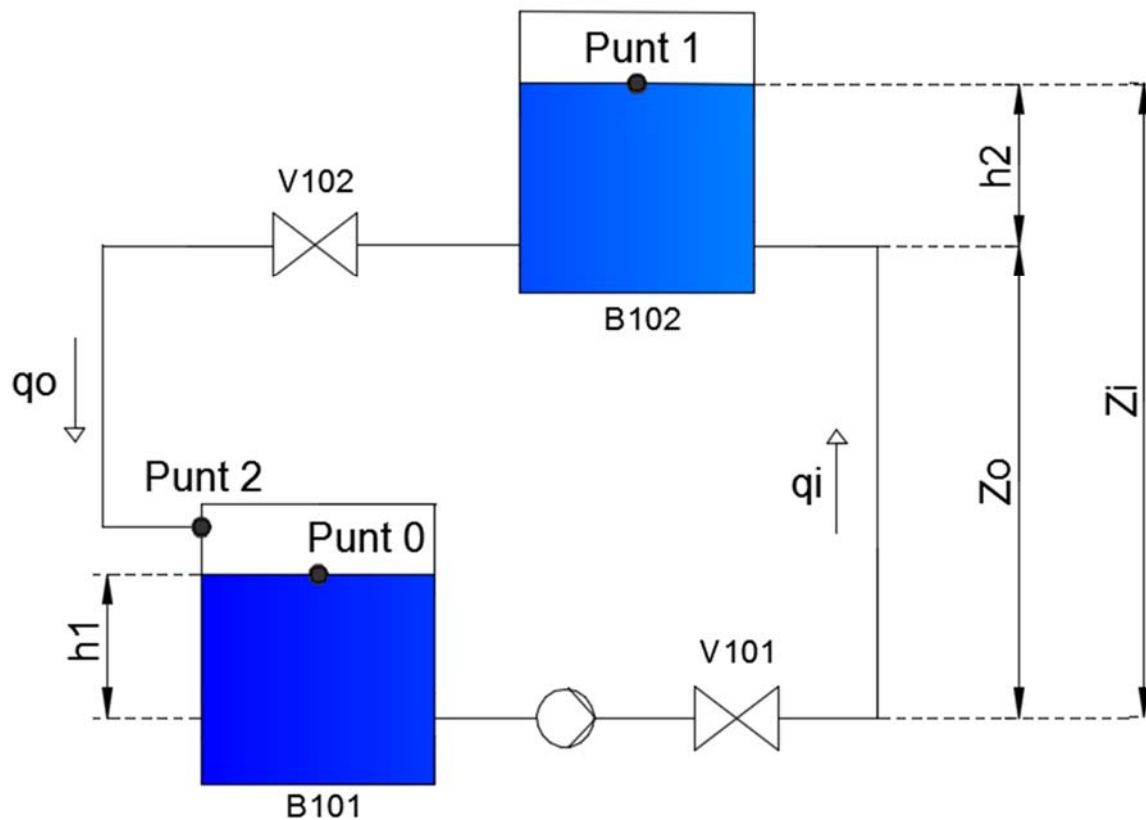


Figura 5.1: Esquema per el balanç de energia en la estació de nivell

Per tant observant l'anterior esquema es plantejaran dos balanços energètics per tal de definir els dos corrents, q_i i q_o . Aquests balanços seran, respectivament, entre el punt 0 i 1 i entre 1 i 2.

Balanç energètic entre 0-1

Segons l'esquema mostrat en la Figura 5.1 plantejant el balanç entre el punt 0 i 1 s'obté:

$$h_1(t) + \frac{W}{q_i(t)\rho g} + \frac{P_{atm}}{\rho g} = z_i(t) + \frac{P_{atm}}{\rho g} + F_{0-1} \quad (5.3)$$

On $h_1(t)$ és l'altura del primer tanc (m), W és el treball efectiu realitzat per la bomba P101 (Watt), P_{atm} és la pressió atmosfèrica en el moment de l'experiment (Pa), z_i l'alçada entre el conducte de sortida de B101 i l'altura de l'aigua en el tanc B102 (m), F_{0-1} representa les pèrdues de carrega entre els dos punts ($m^{-2} \cdot s$), ρ és la densitat del fluid (1000 kg/m^3), g és la acceleració de la gravetat a la terra (9.81 m/s^2).

L'alçada z_i per definició es calcula segons.

$$z_i(t) = z_o + h_2(t) \quad (5.4)$$

Així mateix l'altura del tanc B101, h_1 , serà igual a la diferència entre l'altura total d'aigua (h_t, m) en el circuit menys l'altura h_2

$$h_1(t) = h_t - h_2(t) \quad (5.5)$$

Les pèrdues de càrrega (F_{0-1}) es poden expressar com a

$$F_{0-1} = \frac{q_i^2}{2g} \cdot Rteq_{0-1} \quad (5.6)$$

sent $Rteq_{0-1}$ la resistència total equivalent que presenta el circuit al pas de un corrent.

Substituint (5.4), (5.5) i (5.6) a (5.3) i aïllant W arribem a la següent expressió

$$W = \left(z_o + 2h_2(t) - h_t + \frac{q_i(t)^2}{2g} \cdot Rteq_{0-1} \right) \cdot \rho g q_i(t) \quad (5.7)$$

La qual desenvolupada dona

$$W = z_o \rho g q_i(t) + (2h_2(t) - h_t) \cdot \rho g q_i(t) + \frac{\rho q_i(t)^3}{g} \cdot Rteq_{0-1} \quad (5.8)$$

Aquesta expressió ens descriu el treball que realitza la bomba en funció de l'altura $h_2(t)$ i el corrent $q_i(t)$.

Balanç energètic entre 1-2

Segons l'esquema mostrat en la Figura 5.1 plantejant el balanç s'obté

$$z_1(t) + \frac{P_{atm}}{\rho g} = z_o + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{P_{atm}}{\rho g} + F_{1-2} \quad (5.9)$$

Tenint en compte que la velocitat del fluid és equivalent al cabal segons la relació (5.10)

$$q = u \cdot s \rightarrow u = \frac{q}{s} \quad (5.10)$$

sent s la secció del tub (m^2) per el qual circula el corrent q .

Substituint les expressions **(5.10)** i **(5.6)** per al cas concret del punt 2 en **(5.9)** i aïllant el corrent de sortida $q_o(t)$ s'arriba a

$$q_o(t) = \sqrt{\frac{h_2(t)}{\frac{2g}{s^2} + \frac{Rteq_{1-2}}{2g}}} \quad (5.11)$$

Amb aquesta expressió podem definir el corrent q_o en funció de el nivell del tanc B102

Model complet de la estació

Amb les expressions a les que s'ha arribat en els dos últims apartats, **(5.7)** i **(5.11)**, no som capaços de complementar la expressió general del sistema **(5.1)** per tal d'aconseguir una expressió que ens pugui resultar útil per al control de la estació en la seva actual configuració.

Al substituir les expressions **(5.7)** i **(5.11)** que haurien de definir els cabals q_o i q_i a la equació general del sistema **(5.1)**, ens trobem amb la dificultat d'aïllar el corrent de sortida del tanc B101 (q_i) de les variables de nivell del tanc B102 ($h_2(t)$) i de la potència efectiva realitzada per la bomba P101 (W).

L'únic "input" d'informació que rebem durant la seva operació prové del sensor de nivell situat en B102. La lectura del sensor ens permet conèixer el valor de h_2 al llarg del temps.

Per el cas de la bomba, P101, només coneixem el voltatge aplicat i així mateix no hi ha cap sensor de corrent en el sistema que ens mesuri el cabal.

La dificultat de representar el model per aquesta via recau en el fet de la manca d'informació sobre la bomba P101 que impulsa el sistema. No es disposa de la relació existent entre el diferencial de pressió aplicat i el treball generat per la mateixa. Tampoc hi ha informació disponible de la eficiència del treball generat en els manuals del proveïdor.

Aquest fet és agreujat per la expressió algebraica a la que s'arriba al intentar solucionar l'equació.

Per aquest motiu s'ha optat per modelitzar el sistema fixant-nos amb els diferencials de pressió que s'estableixen en el mateix. Amb aquesta simplificació del problema resulta més senzilla la modelització.

Model del corrent de retorn del tanc B102

En la Figura 5.2 es mostra l'esquema simplificat del procés de retorn. Per tal de determinar q_o , que és el corrent que circula per un tub de retorn del tanc B102 al B101, ens fixarem en el balanç de pressions diferencials que s'estableix en aquest sistema.

Suposarem que la vàlvula manual V102 està totalment oberta i no es tindrà en compte les diferents obertures que pot tenir per a l'elaboració d'aquest model. La resistència que presenta al corrent es comptabilitzarà conjuntament amb la resistència del conducte.

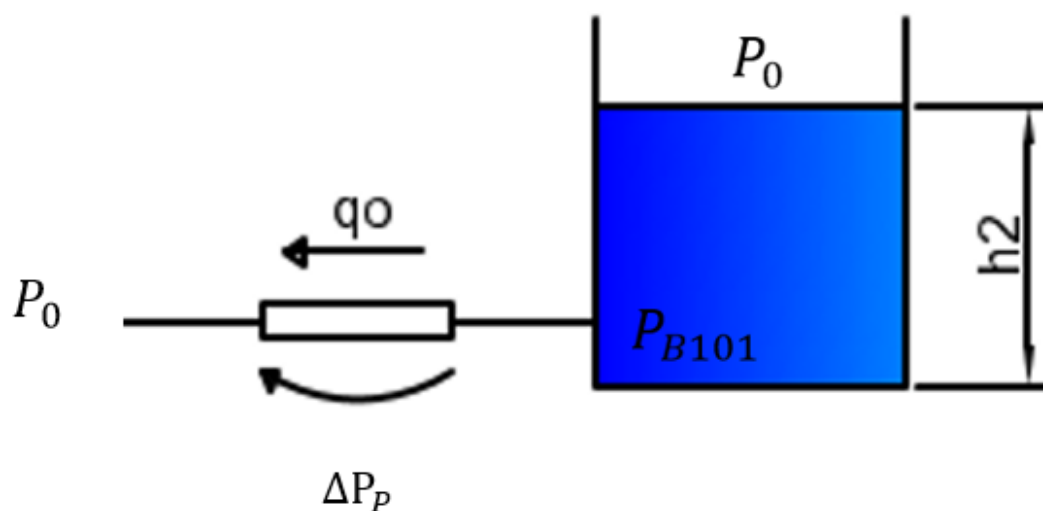


Figura 5.2: Esquema del procés de retorn (original)

La variable $\Delta P(t)$ (Pa), correspon a les pèrdues de pressió que tenen lloc en el conducte per on circula el corrent de retorn, q_o (m^3/s). És funció d'aquest mateix corrent i de les característiques del conducte definida per l'expressió **(5.12)**

$$\Delta P_p(t) = k_{r2} q_o(t)^2 \quad (5.12)$$

La pressió del fons del tanc, $P_{B102}(t)$, és depenen de la columna d'aigua dins el tanc, que al seu torn és funció de l'altura del líquid dins el tanc ($h_2(t)$), i de la pressió atmosfèrica. La suma de aquestes dues pressions ens definirà la variable, $P_{B102}(t)$.

$$P_{B102}(t) = P_o + \rho g h_2(t) \quad (5.13)$$

A on, P_o és la pressió atmosfèrica (Pa), ρ és la densitat del fluid (1000 kg/m^3), g és la acceleració de la gravetat a la terra (9.81 m/s^2) i k_{r2} és una constant que ens defineix la resistència del conducte al pas del corrent.

Tenint en compte que segons es mostra en la Figura 5.2, al tractar-se de tancs oberts la pèrdua de càrrega entre el principi del tub conductor de q_o i el seu final també serà :

$$\Delta P(t) = P_{B102}(t) - P_o \quad (5.14)$$

al combinar l'equació (5.13) amb (5.14) s'obté:

$$\Delta P(t) = \rho g h_2(t) \quad (5.15)$$

Plantejant el balanç de pressions parcials per al sistema s'obté

$$\begin{aligned} 0 &= \Delta P(t) - \Delta P_p(t) \\ 0 &= \rho g h_2(t) - k_{r2} q_o(t)^2 \end{aligned} \quad (5.16)$$

i per tant aïllant q_o s'obté (5.17):

$$\boxed{q_o(t) = 1/k_{r2} \sqrt{\rho g h_2(t)}} \quad (5.17)$$

Per tal de simplificar-ne l'expressió reescrivim el model com a:

$$\begin{aligned} k &= 1/k_{r2} \\ \boxed{q_o(t) = k \sqrt{\rho g h_2(t)}} \end{aligned} \quad (5.18)$$

Model del corrent de entrada al tanc B102

En la Figura 5.3 es mostra l'esquema simplificat del procés d'entrada d'aigua al tanc B102:

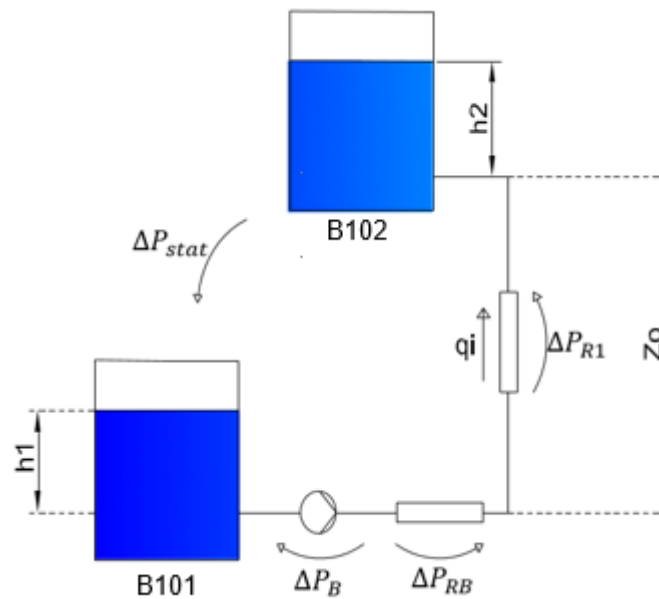


Figura 5.3: Esquema de l'entrada al tanc B102

Per tal de determinar q_i plantejarem el balanç de les diferents pressions parcials del sistema.

Suposarem que la vàlvula manual V101 està totalment oberta durant l'operació de l'estació. Per tant la seva resistència a la circulació de l'aigua serà comptabilitzada dins les pèrdues dels conductes per a l'elaboració d'aquest model.

S'observa que a favor del sentit del corrent q_i tenim la pressió proporcionada per la bomba (ΔP_B) i en contra, les pèrdues de càrrega tant de dins la bomba com del tub (ΔP_{RB} i ΔP_{R1} respectivament) així com el diferencial de pressió degut a la diferent alçada (ΔP_{stat}) expressat per **(5.19)**.

$$\frac{dP}{dt} = \Delta P_B - \Delta P_{stat} - \Delta P_{R1} - \Delta P_{RB} \quad (5.19)$$

La pressió proporcionada per la bomba es pot expressar mitjançant la expressió **(5.20)** i per les pèrdues de càrrega en la bomba i el conducte les expressarem amb les expressions **(5.21)** i **(5.22)** respectivament.

$$\Delta P_B = k_B N^2 \quad (5.20)$$

$$\Delta P_{RB} = k_{RB} q_i(t)^2 \quad (5.21)$$

$$\Delta P_{R1} = k_{R1} q_i(t)^2 \quad (5.22)$$

A on, N és la velocitat de la bomba en (rps), $q_i(t)$ és el corrent d'entrada (m^3/s) i k_B , k_{RB} i k_{R1} són constants característiques del sistema.

Per al diferencial de pressió donat per l'alçada

$$\Delta P_{stat} = \rho g(Z_0 + h_2(t) - h_1(t)) \quad (5.23)$$

Tenint en compte que el circuit és tancat i per tant sempre hi ha la mateixa quantitat d'aigua total i que els dos tancs son exactament iguals, podem afirmar que, $h_T = h_1(t) + h_2(t)$. Substituint aquesta expressió a (5.24) s'obté:

$$\Delta P_{stat} = \rho g(Z_0 + 2h_2(t) - h_T) \quad (5.24)$$

Sent ρ és la densitat del fluid (1000 kg/m^3), g és l'acceleració de la gravetat a la terra (9.81 m/s^2), Z_0 la diferencia d'alçada entre l'entrada del corrent q_i al tanc B102 i la seva sortida en el tanc B101 (m), h_2 l'alçada de l'aigua en el tanc B102 (m) i h_t la suma d'alçades dels dos tancs que romandrà constant (m).

Combinant les equacions (5.20), (5.21), (5.22), i (5.24) a (5.19) obtenim:

$$\frac{dP}{dt} = k_B N^2 - \rho g(Z_0 + h_2 - h_1) - (k_{R1} + k_{RB})q_i^2 \quad (5.25)$$

Considerant en l'estat estacionari, q_i és constant. Això implica que la suma de les pressions parcials ha de ser igual a 0. Igualant l'expressió (5.25) a 0 i aïllant q_i :

$$q_i = \sqrt{\frac{k_B N^2 - \rho g(Z_0 + 2h_2 - h_T)}{k_{R1} + k_{RB}}} \quad (5.26)$$

Combinant les dues equacions obtingudes en la modelització del corrents d' entrada i sortida del tanc B102, (5.18) i (5.26) amb la expressió general de la estació (5.2) obtenim el model matemàtic complet per al sistema.

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(\sqrt{\frac{k_B N(t)^2 - \rho g(Z_0 + 2h_2 - h_T)}{k_{R1} + k_{RB}}} - k \sqrt{\rho g h_2(t)} \right) \quad (5.27)$$

Quan s'estableixi l'estat estacionari en el sistema es complirà que la variació del volum en els tancs serà nul·la per tant es pot afirmar que h_2 serà constant i en conseqüència de la expressió (5.2) deduïm:

$$q_0 = q_i \quad (5.28)$$

$$k\sqrt{\rho g h_2} = \sqrt{\frac{k_B N^2 - \rho g (Z_0 + 2h_2 - h_T)}{k_{R1} + k_{RB}}}$$

En estat estacionari el nivell estarà relacionat amb la velocitat de la bomba N segons:

$$h_2(N) = \frac{k_B N^2 - \rho g (Z_0 - h)}{\rho g (2 + k^2 [k_{R1} + k_{RB}])} \quad (5.29)$$

Model lineal

Per a obtenir un sistema lineal de la variable a controlar (h_2) en funció de la velocitat de la bomba (N) es linealitzaran les expressions del model al voltant de un punt (estat estacionari).

Per tal d'obtenir la funció de transferència entre aquestes dues variables s'aplicarà la transformada de Laplace.

Linealitzant la expressió (5.17) per el corrent de sortida q_o

$$\Delta q_o(t) = \frac{\rho g \bar{h}_2}{2 \cdot k_{r2} \bar{q}_o} \cdot \Delta h_2(t) \quad (5.30)$$

Linealitzant l'expressió (5.26) per el corrent d'entrada al tanc B102:

$$\Delta q_i(t) = \frac{2k_B \bar{N}}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})} \cdot \Delta N(t) - \frac{\rho g 2\bar{h}_2}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})} \cdot \Delta h_2(t) \quad (5.31)$$

Substituint les expressions (5.30) i (5.31) en la (5.2) obtenim (5.32) i fent la transformada de Laplace de aquesta i aïllant $\Delta H_2(s)$ ens resulta (5.33)

$$A \cdot \frac{\Delta h_2}{dt} = \frac{2k_B \bar{N}}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})} \cdot \Delta N(t) - \frac{\rho g 2\bar{h}_2}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})} \cdot \Delta h_2(t) - \frac{\rho g \bar{h}_2}{2 \cdot k_{r2} \bar{q}_o} \cdot \Delta h_2(t) \quad (5.32)$$

$$\Delta H_2(s) = \frac{\frac{2k_B \bar{N} A^2}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})}}{\left(s + \frac{\rho g 2\bar{h}_2 A}{2\bar{q}_i(k_{R1} + k_{RB})} + \frac{\rho g \bar{h}_{2A}}{2 \cdot k_{r2} \bar{q}_o} \right)} \cdot \Delta N(s) \quad (5.33)$$

5.1.2. Estació de pressió

Per tal de determinar la pressió s'observarà per a quins factors és determinada dins B303. Com es pot observar en la Figura 5.4 la pressió que s'estableix dins el tanc és resultat de la pressió inicial en el moment de generar-se la estanqueïtat (tancant la vàlvula V307 i V309) així com la pressió aportada per la bomba P301.

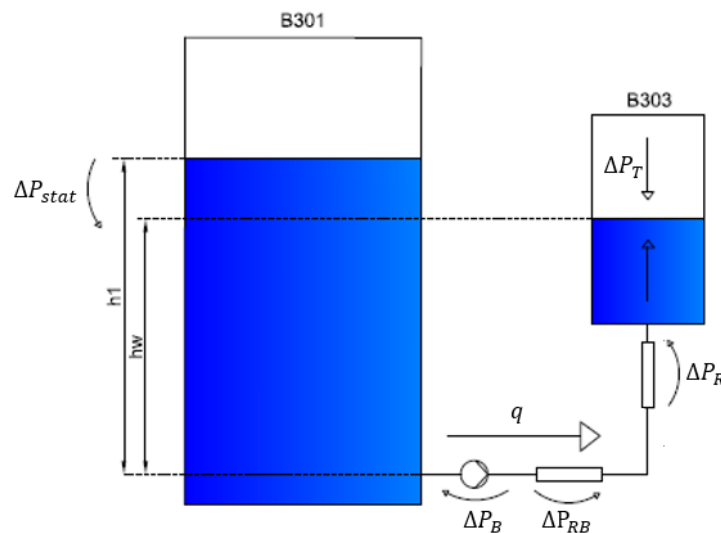


Figura 5.4: Esquema de l'operació en l'estació de pressió

Aquesta pressió es tradueix en un augment del nivell de l'aigua dins el tanc que al seu torn limita l'espai del gas atrapat dins l'equip.

Es pot quantificar aquest augment de pressió utilitzant la llei dels gasos ideals **(5.34)**.

$$V \cdot P = n \cdot R \cdot T \quad (5.34)$$

On V és el volum lliure dins B303 (m^3). P la pressió del gas (atm), en aquest cas aire. n el nombre de mols de gas que hi ha en el recipient. R la constant dels gasos ideals ($8,2 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot atm/K \cdot mol$) i per últim T representa la temperatura del gas (en K).

Aïllant de l'anterior expressió **(5.35)**.

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (5.35)$$

Així la pressió dins el tanc B303 pot ser definida com la pressió inicial del gas abans de que es produeixi un canvi més la pressió generada per una diferencia en el volum del mateix gas **(5.36)**. Per tant tenint en compte la expressió **(5.35)** ens resta **(5.37)**.

$$\frac{\Delta P(t)}{dt} = P_o + P_1(t) \quad (5.36)$$

$$\frac{\Delta P(t)}{dt} = P_o + \frac{n \cdot R \cdot T(t)}{V(t)} \quad (5.37)$$

On $P(t)$ és el valor total de la pressió dins el tanc pressuritzat (B303) en atm. P_o és la pressió inicial dins B303 en atm i $P_1(t)$ és el canvi provocat per el volum lliure ocupat per el gas dins el recipient, també en atm.

En cas de la estació actual no es disposa de un sensor de nivell dins el tanc B303. En el cas de disposar-ne ens resultaria molt fàcil ser capaços de calcular el volum ocupat per l'aigua en tot moment.

L'única manera de controlar el nivell de líquid dins el tanc és mitjançant un control visual del tub transparent que hi ha paral·lel al B303.

En vistes de les dificultats de plantejar un control automàtic en referència al nivell ocupat dins el tanc s'intentarà definir la pressió P_1 mitjançant el balanç d'energia.

Ens fixem en la Figura 5.5 per tal de plantejar el balanç d'energia del sistema.

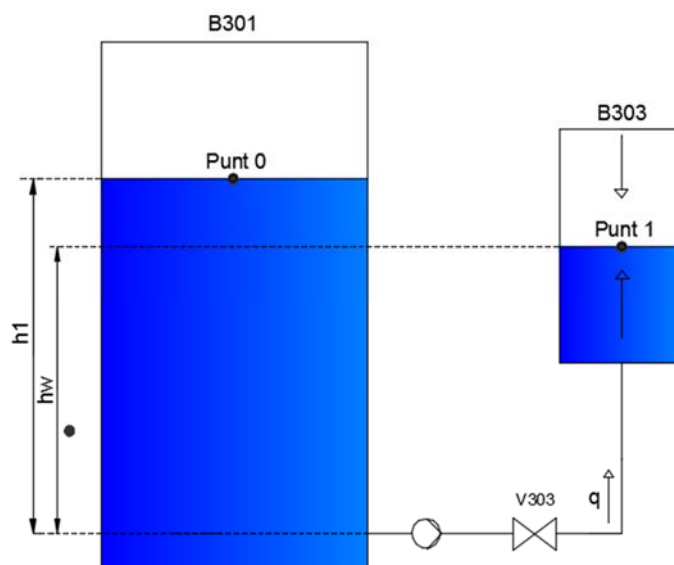


Figura 5.5: Esquema de la estació per al plantejament del balanç d'energia.

Sobre el supòsit que es parteix de la pressió atmosfèrica dins el tanc B303 es planteja el balanç entre els punts 0 i 1 **(5.38)** en una situació dinàmica en la qual el nivell h_w no està estable i per tant hi ha un corrent q circulant per el sistema.

$$h_1(t) + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{W}{q \rho g} = h_w(t) + \frac{P_a}{\rho g} + \frac{P_1}{\rho g} + F_{0-1} \quad (5.38)$$

Per el qual ρ és la densitat del fluid (1000 kg/m^3), g és la acceleració de la gravetat a la terra (9.81 m/s^2), h_1 (m) l'alçada de l'aigua al tanc B303 i h_w (m) l'alçada de l'aigua en el recipient B301.

P_a és la pressió atmosfèrica (atm), W és el treball de la bomba (watts) i F_{0-1} les pèrdues de càrrega del fluid entre els punts 0 i 1 a causa de la fricció.

Aïllant P_1 de la expressió s'obté **(5.39)**.

$$P_1 = \frac{h_1(t) - h_w(t)}{\rho g} - \frac{q^2 \cdot R_{teq_{0-1}}}{g} + \frac{W}{q} \quad (5.39)$$

A on P_T serà la pressió dins el tanc (atm), V el volum ocupat per l'aire (m^3), n el nombre de mols d'aire, R la constant universal dels gasos ($8,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{atm/K} \cdot \text{mol}$) i T la temperatura del gas (K).

De manera similar a l'estació anterior ens trobem amb la dificultat de conèixer el treball efectiu exercit per la bomba P301 així com per saber la magnitud del corrent q sense cap mesurador de cabal en el conducte ni de nivell en cap dels dos tancs.

Per tal de solucionar aquest inconvenients per aquesta estació es decideix plantejar la equació general per a un sistema de segon ordre **(5.40)** (en domini de Laplace).

$$G(s) = k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.40)$$

On k és el guany característic del sistema, ω_n és la freqüència real no esmorteïda i ξ el factor d'esmoreïment. Per tal de completar els paràmetres de l'expressió es realitzaran experiments en llaç obert per obtenir el seu valor en l'apartat de calibratge del model.

5.1.2.1. Model en domini Laplace

La expressió **(5.40)** ens defineix la funció de transferència entre l'entrada en el sistema i la seva resposta tal i com es representa el la Figura 5.6.

Les entrades en aquest sistema ($E(s)$ en domini Laplace), com ja s'ha mencionat, seran el voltatge aplicat a la bomba P301.

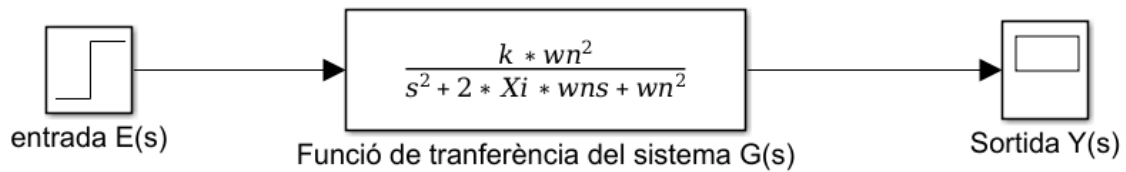


Figura 5.6: Representació de la funció de transferència per a l'estació de pressió en forma de diagrama de blocs.

Podem representar aquestes entrades com a forma d'esglaió de valor x en funció del voltatge aplicat **(5.41)**.

$$U(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ x, & t \geq 0 \end{cases}$$

Sent x el valor aplicat a la bomba en V **(5.41)**

La transformada de Laplace per a un esglaió és **(5.42)**

$$U(s) = \frac{x}{s} \quad (5.42)$$

Per tant el valor de la resposta ($S(s)$) seguint el diagrama de blocs mostrat en la Figura 5.6 serà la multiplicació de el valor d'entrada per $G(s)$ **(5.43)**.

$$S(s) = E(s) \cdot G(s) = \frac{x}{s} \cdot \frac{k \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{x \cdot k \cdot \omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (5.43)$$

Conseqüentment el valor resultat per a la resposta serà definida per l'anti-transformada de l'anterior expressió **(5.44)**

$$\frac{x \cdot k \cdot \omega_n^2}{s(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)} \xrightarrow{L^{-1}} \left[xk - \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1-\xi^2} t + \phi) \right] = S(s) \quad (5.44)$$

On ϕ és:

$$\phi = \cos^{-1}\xi$$

5.2. Calibratge

5.2.1. Estació de nivell

Per tal de trobar les constants del model matemàtic recuperarem l'equació (5.27) de l'apartat anterior

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(\sqrt{\frac{k_B N(t)^2 - \rho g (Z_0 + 2h_2 - h_T)}{k_{R1} + k_{RB}}} - k \sqrt{\rho g h_2(t)} \right) \quad (5.27)$$

Les constants a calcular són k_B , k_{R1} i k_{RB} del corrent d'entrada al tanc superior (q_i) i k del corrent de sortida (q_o).

5.2.1.1. Determinació de les constants del corrent de sortida

L'experiment consistirà en deixar retornar l'aigua lliurement des de el tanc B102 al B101 obrint la vàlvula manual V102. S'enregistraran les dades de nivell gracies al sensor i amb una targeta d'adquisició de dades.

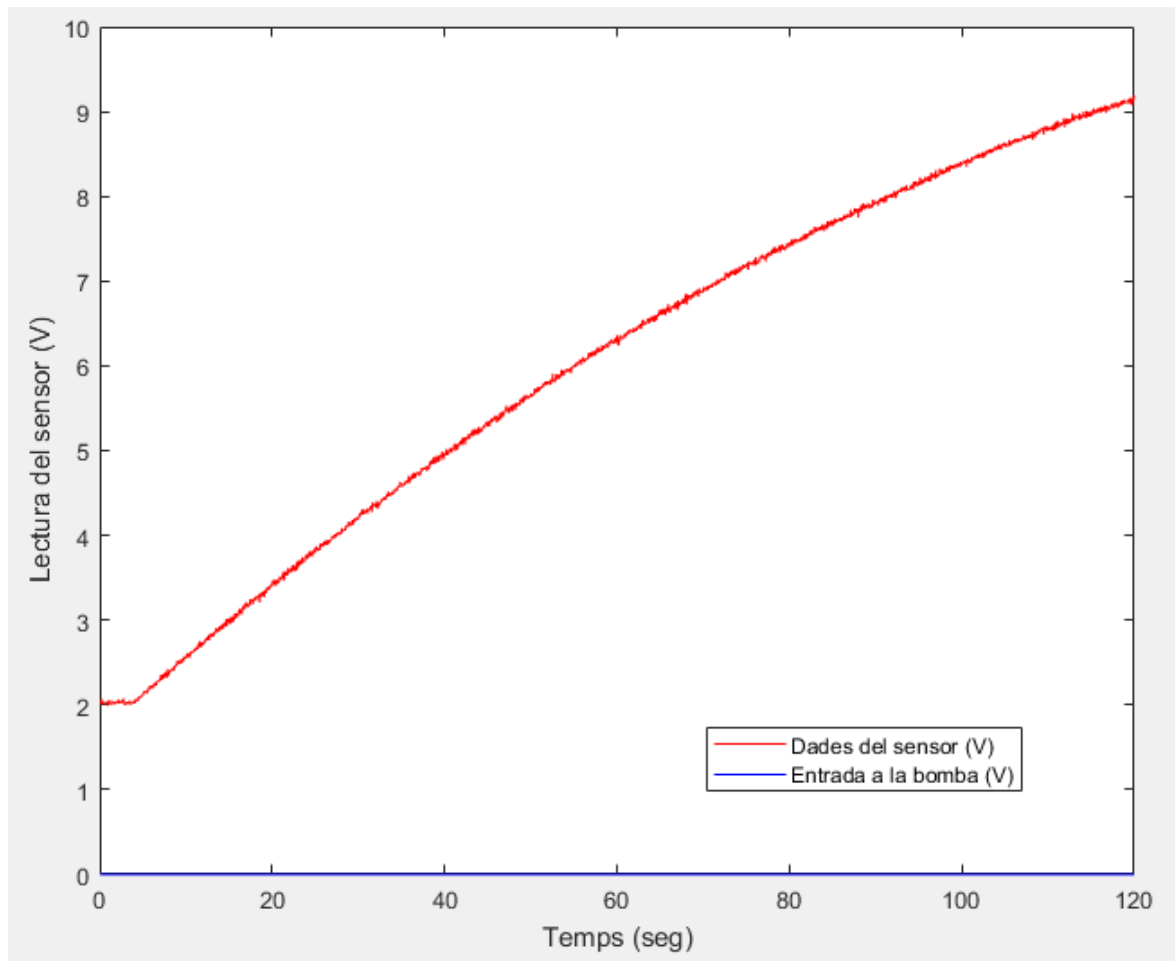
L'experiment va ser realitzat amb una altura del tanc B102 inicial de 302 mm així com una altura total de 330 mm. Al final de l'experiment h_2 era de 20 mm.

Per tal de determinar k es tancarà la vàlvula manual V102 i omplint al màxim possible el tanc B102 per després també tancar la vàlvula manual V101. Suposant que amb aquesta altura inicial d'aigua el corrent de q_o serà el màxim permès per la canonada. S'obrirà la vàlvula V102 i s'observarà el canvi de nivell. Aïllarem k de l'expressió (5.18) de l'apartat anterior, obtenint (5.45) que ens permet calcular el valor de k coneixent q_o i h_2 .

$$k = \frac{q_o(t)}{\sqrt{\rho g h_2(t)}} \quad (5.45)$$

El diferencial aplicat a la bomba va ser de 0V (ja que és un retorn lliure) i el temps de mostreig utilitzat per al enregistrament de dades era 0,05 segons. La lectura del sensor té un rang de 0 a 10 volts sent 10 el tanc buit i 0 tanc ple. L'experiment va durar 120 segons.

Aquestes dades es guarden en un fitxer anomenat Buidatge302.txt tal i es mostren en el Gràfic 5.1.



Gràfic 5.1: Dades recollides pel sensor

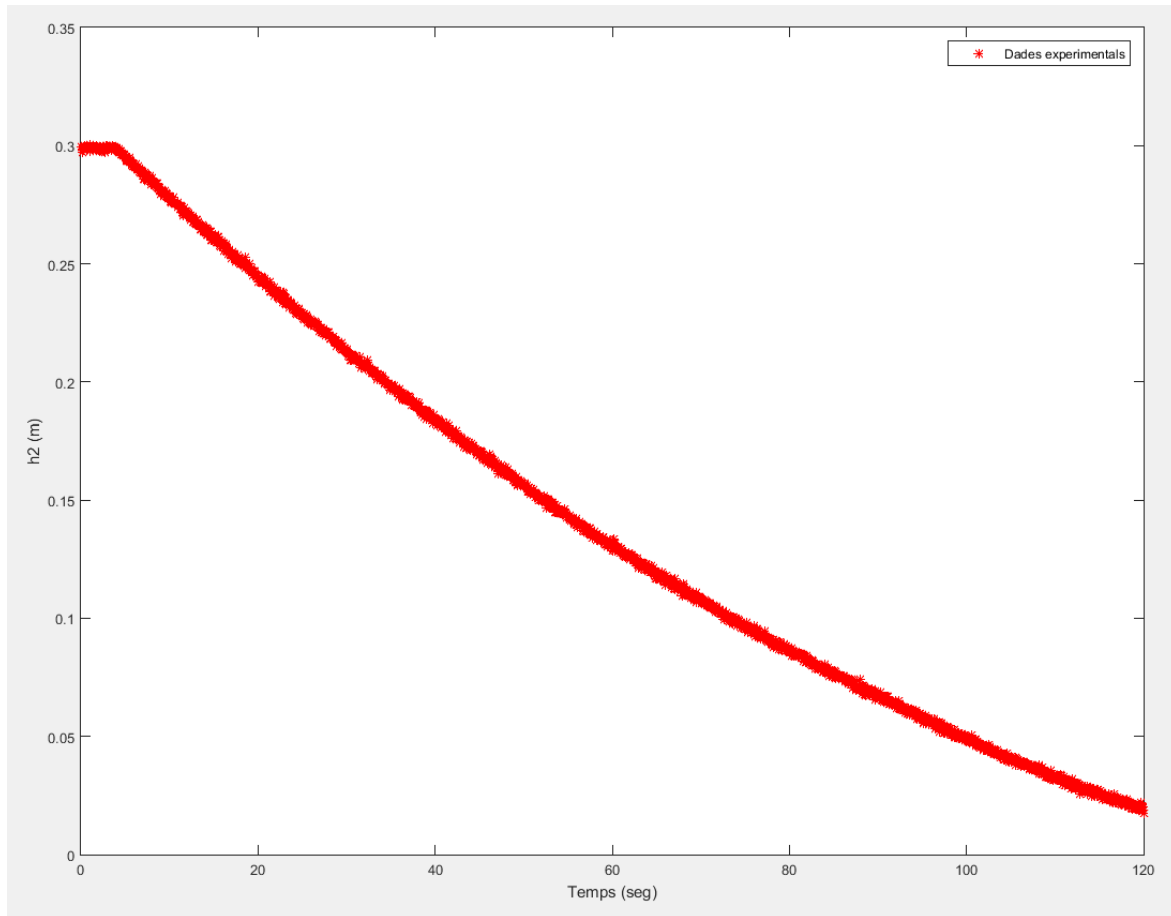
Per passar del valor de la lectura del sensor al valor real en alçada s'anoten l'alçada inicial del líquid així com la final. Un cop tenim les lectures del sensor es realitza una recta de regressió amb les dues altures en front del primer i l'últim valor donat per el sensor.

La recta obtinguda va ser

$$h_2 = 0.376861 - 0.039305 \cdot x \quad (5.46)$$

Sent x el valor de la lectura del sensor i les unitats de la altura resultant metres.

Fent la representació gràfica de l'altura del tanc B102 (h_2) segons el sensor de nivell en el pas del temps d' aquesta experiència obtenim el *Gràfic 5.2*.



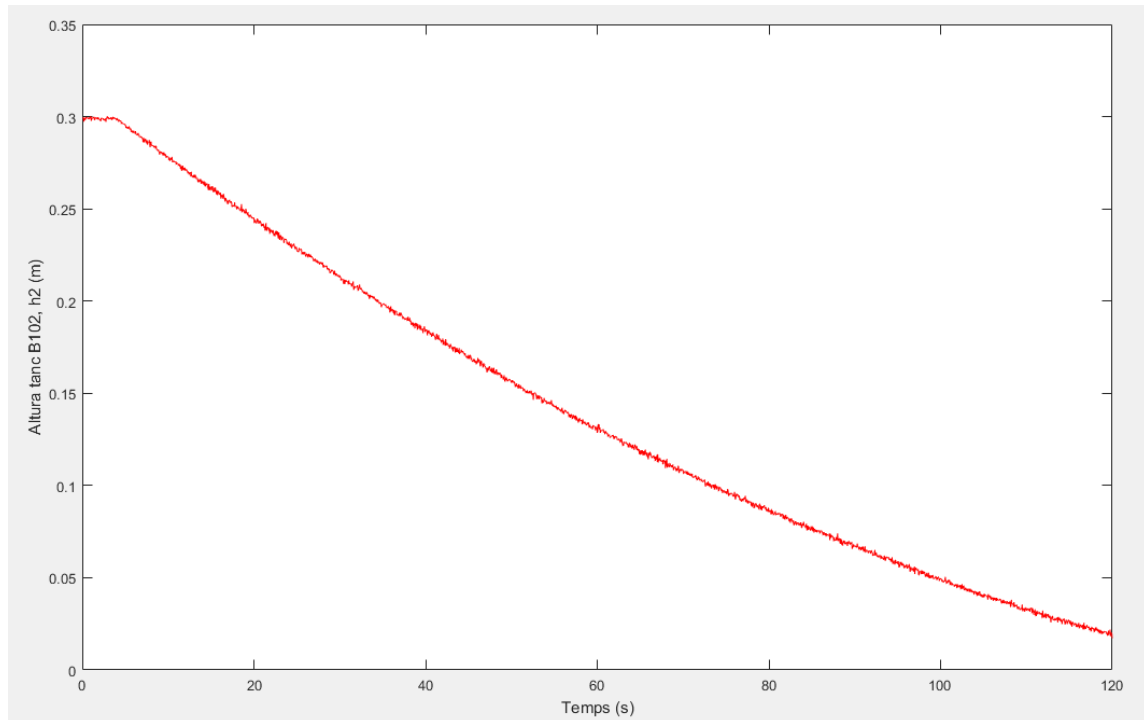
Gràfic 5.2 Nivell del tanc B102 amb el retorn lliure, dades experimentals

Representant les dades experimentals en forma de punt no observem bé la seva tendència a petita escala. Per tal de visualitzar-ho amb més claredat les representem de manera continua (Gràfic 5.3).

Com es pot observar hi ha certa imprecisió en la lectura del sensor motiu per el qual es filtraran les dades fent servir un filtre discret de la forma

$$h_2f(n) = \alpha \cdot h_2(n-1) + (1 - \alpha) \cdot h_2(n-1) \quad (5.47)$$

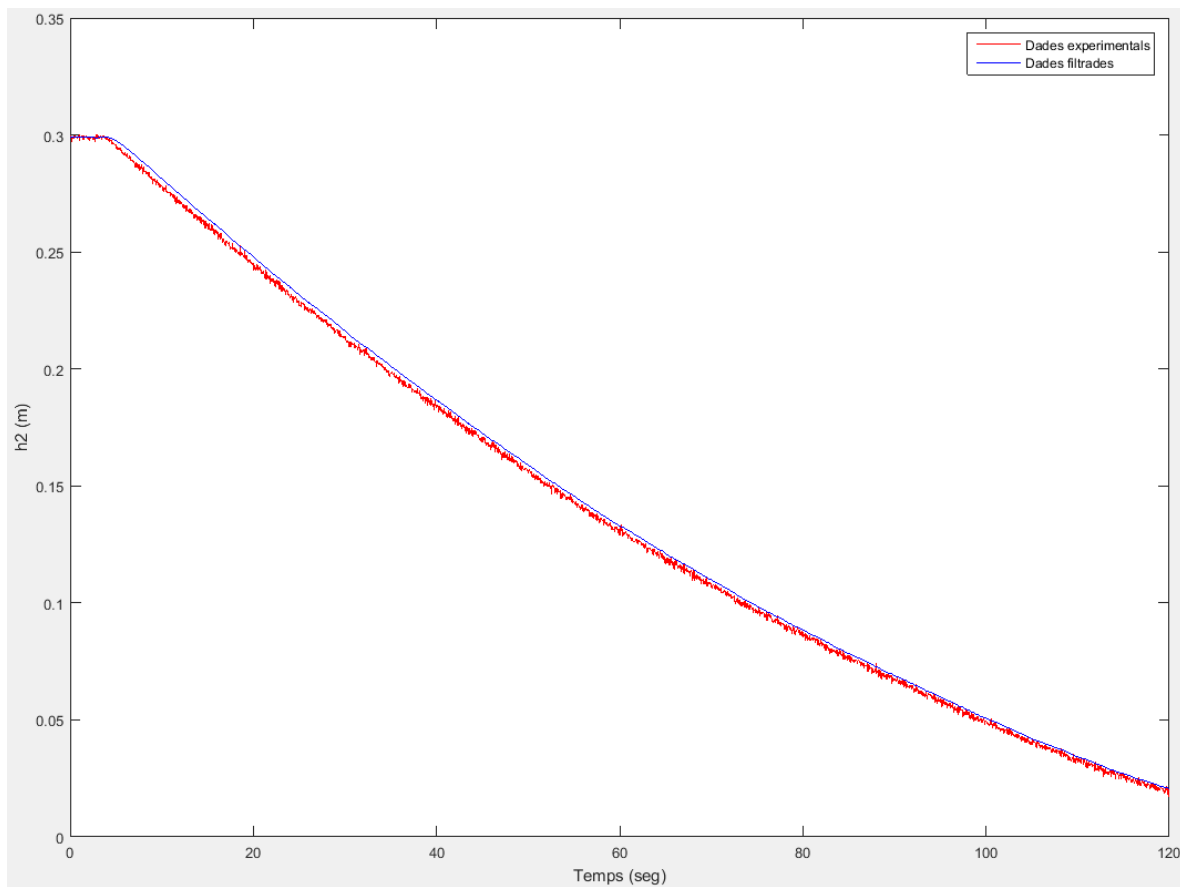
Sent $\alpha = 0.95$ i h_2f la dada d'alçada filtrada.



Gràfic 5.3: Nivell del tanc B102 amb el retorn lliure, dades experimentals representació continua

Comparant les anteriors dades experimentals amb les obtingudes després d'aplicar el filtre i mantenint la representació continua per tal de avaluar la tendència s'obté el *Gràfic 5.4*.

Aquestes imprecisions poden ser donades per el fet que l'aigua no puja de manera totalment calmada i hi han oscil·lacions en la seva superfície i també a causa del soroll de fons en la lectura del sensor.

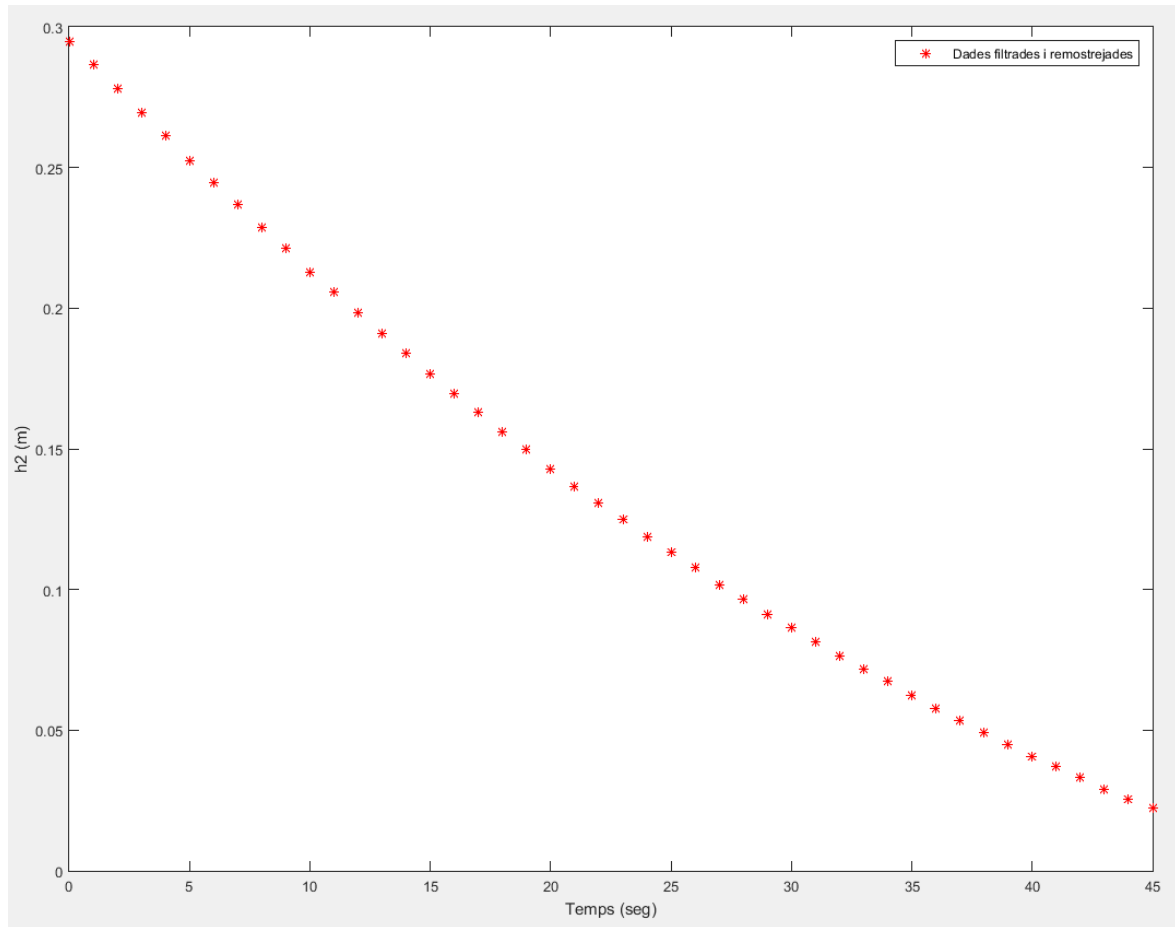


Gràfic 5.4: Nivell del tanc B102, comparació de dades experimentals i filtrades

S'observen dos fenòmens. El dipòsit comença a buidar-se a l'instant 5 segons, que es correspon amb l'obertura de la vàlvula V102 i, degut al filtre, s'introdueix un cert decalatge en la lectura de les dades.

Es re-mostrejaran les dades per tal de analitzar solament la part on el buidat del tanc està tenint lloc i per compensar el decalatge introduït per el filtre.

Les dades, un cop re-mostrejades, amb les quals realitzarem l'ajust són representades en *Gràfic 5.5*.



Gràfic 5.5 Dades filtrades i re-mostrades

Amb les dades re-mostrades es calcularà el flux amb la derivada centrada **(5.48)** i el punt mig de nivell **(5.49)** amb les quals es calcularan el valor de la constant k .

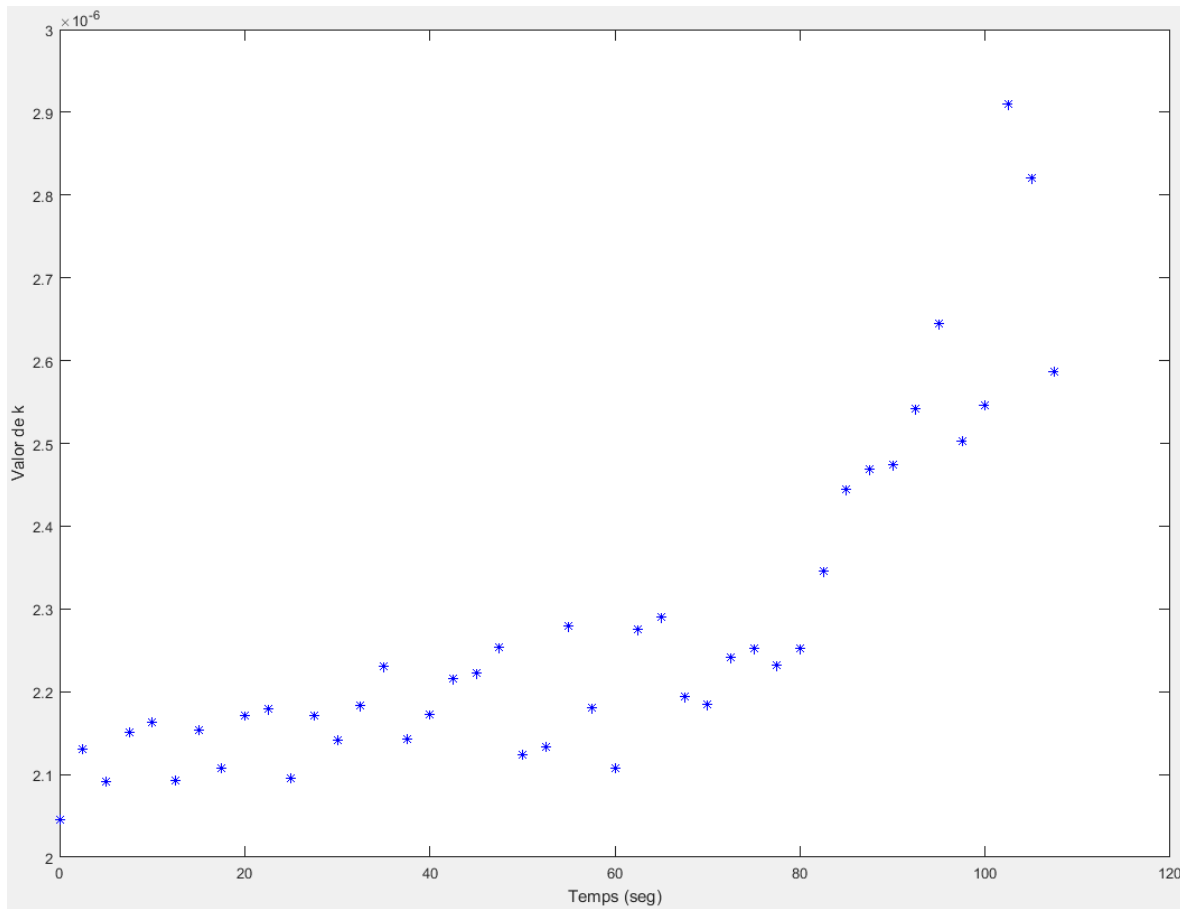
$$dh_2(n) = \frac{h_2(n) - h_2(n+2)}{2 \cdot dt} \quad (5.48)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2(n) + h_2(n+2)}{2} \quad (5.49)$$

Recuperant la expressió **(5.45)**, utilitzarem la multiplicació de la derivada centrada per l'àrea per obtenir una estimació del flux i avaluant la part de l'equació del model ($\sqrt{\rho g h_2(t)}$) amb les dades de mitjana de nivell per a h_2 .

$$k = \frac{q_o(t)}{\sqrt{\rho g h_2(t)}} = \frac{dh_2(t) \cdot A}{\sqrt{\rho g h_2 \bar{x}(t)}} \quad (5.50)$$

Representant el valor de k obtinguts es pot observar que no és constant (Gràfic 5.6).



Gràfic 5.6: Representació de k en el temps

Per tant es pot afirmar que el model al que s'ha ajustat no és correcte ja que no s'obté un valor constant per a k .

S'ajusten les dades utilitzades amb anterioritat per tal ajustar les constants a un nou model de la forma :

$$q_o(t) = k1 \cdot \sqrt{\rho g h_2(t)} + k2 \quad (5.51)$$

Aquesta constant k_2 correspon al nivell del tanc B102 per el qual el corrent de retorn és 0.

Ajustant les dades obtingudes amb anterioritat al nou model utilitzant la funció de matlab *polyfit*, funció que retorna els coeficients del polinomi, d'expressió i grau fixat per a l'usuari, que millor s'ajusta a una sèrie de valors.

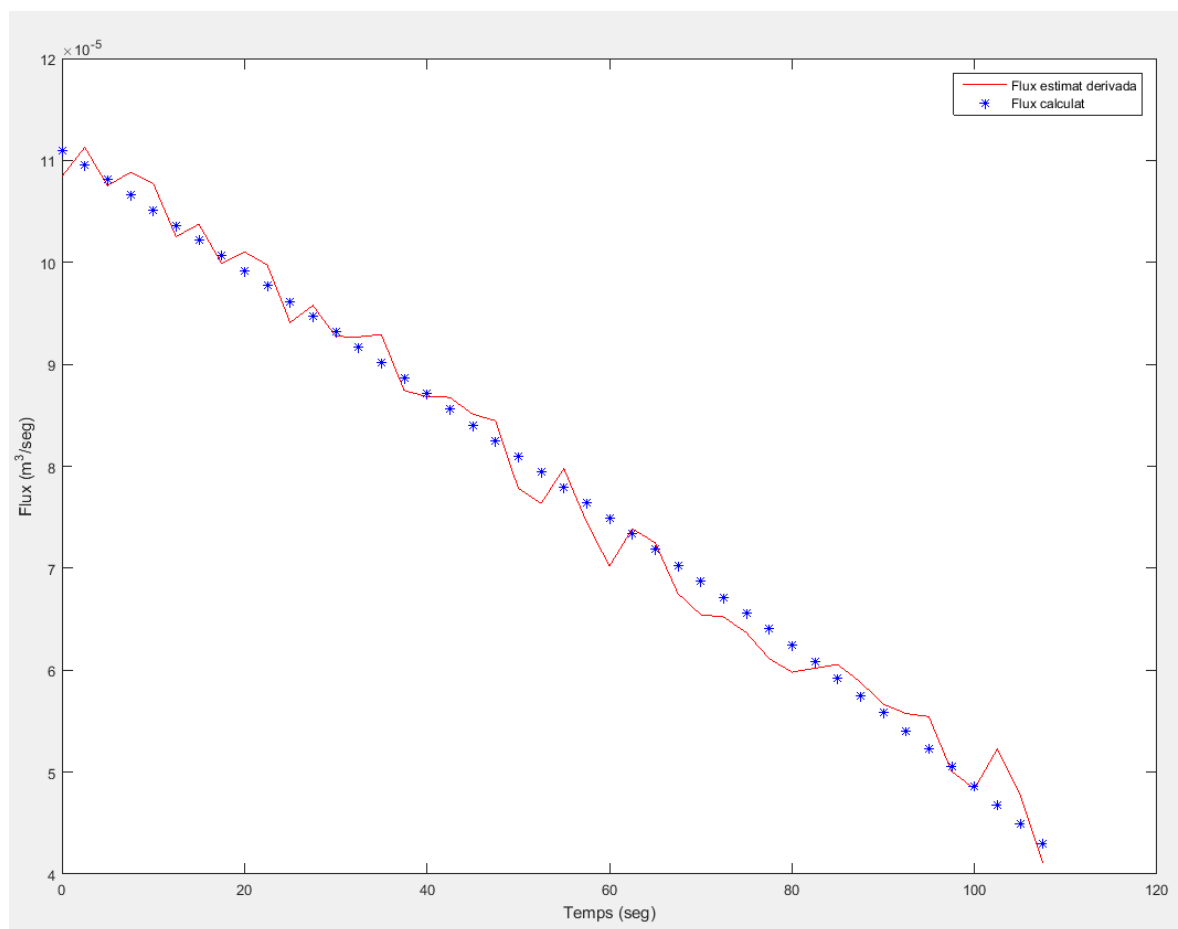
Per a solucionar el nostre problema el polinomi a utilitzar serà (5.52) i l'ajustarem a l'aproximació del flux $q_o(t)$ donat per la multiplicació de la derivada centrada del nivell $h_2(t)$ tal i com s'ha descrit en la equació (5.50).

$$p(t) = \sqrt{\rho g h_2(t)} \quad (5.52)$$

En aquest cas obtenim el valor de les dues constants (5.53).

$$k_1 = 1,83 \cdot 10^{-6} \quad k_2 = 1,38 \cdot 10^{-5} \quad (5.53)$$

Representant el flux obtingut amb el nou model en front de l'aproximació de la derivada centrada s'observa una bona correlació



Gràfic 5.7: Comparació del nou model amb l'aproximació de la derivada centrada

5.2.1.2. Determinació de les constants del corrent d'entrada

Per tal de determinar les constant del sistema que hem trobat en l'apartat de modelització, es duran a terme diverses experiències, aplicant diferents voltatges a la bomba.

Per aquest experiments es col·locarà la vàlvula manual de pas entre els dos tancs, V101, en posició oberta i la del corrent de retorn del tanc B102 al B101, V102, tancada. A l'inici tota l'aigua estarà dins el tanc inferior B101. L'objectiu serà observar a quina altura s'estabilitza el nivell de l'aigua del tanc superior B102 per a diferents voltatges aplicats.

Fent servir la mateixa recta de regressió calculada per a l'apartat anterior es calcularà l'alçada mesurada per el sensor.

Utilitzant el model matemàtic trobat a l'apartat 5.1.2 es crea un document Matlab en qual es defineix la equació (5.27).

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A} \left(\sqrt{\frac{k_B N(t)^2 - \rho g (Z_0 + 2h_2 - h_T)}{k_{R1} + k_{RB}}} - k \sqrt{\rho g h_2(t)} \right) \quad (4.18)$$

Es definirà un programa Matlab on hi haurà definit el model en forma de funció. L'objectiu del programa serà ajustar les constant del sistema desconegudes, k_B , k_{R1} , k_{RB} i k . S'utilitzarà les dades experimentals obtingudes en les experiències comparant-les amb el resultat de la funció de Matlab on hi ha definit el model.

La diferència entre les dades experimentals i les generades per el model seran minimitzades variant el valor de les constants prèviament dimensionades. El valor de les constants pel qual es tingui la menor diferencia entre les dues sèries serà l'adequat.

Aquesta funció la intentem solucionar amb l'expressió "ode45" del Matlab que és un mètode de resolució de equacions diferencials .

Aquesta funció ens resoldrà les equacions a partir de un valor inicial de les constants donat per l'usuari. El resultat d'aquesta funció serà comparat amb el valor experimental obtingut i utilitzant la funció de Matlab "fminsearch", funció que busca els mínims d'expressió multivariables a traves d'un mètode no derivatiu, s'ajustaran els valors de les constants que resulten en una mínima diferencia entre el valor experimental i el obtingut per la funció "ode45".

Fent aquest petit programa vam veure que Matlab no era capaç de solucionar el script i acabava per donar error. Això pot ser degut a una sèrie de motius diferents com ara que el model és erroni, la complexitat del càlcul és massa gran a causa de expressions poc eficients o una mala construcció del problema.

El document complert Matlab on hi ha l'arxiu s'anomena "Ajust_Nivell.m".

A més a més es va veure que el fet de plantejar la variable a controlar del nostre sistema ($h_2(t)$) en funció de la velocitat de rotació de la bomba P101 ($N(t)$) podia resultar poc pràctic ja que implicava que la variable d'entrada, el voltatge a la bomba, havia de ser convertit a rpm. El fet de no conèixer la corba de treball de la bomba dificultava el procés.

Tenint en compte el motius esmentats es va decidir fer un nou model basat en l'estudi del comportament del sistema.

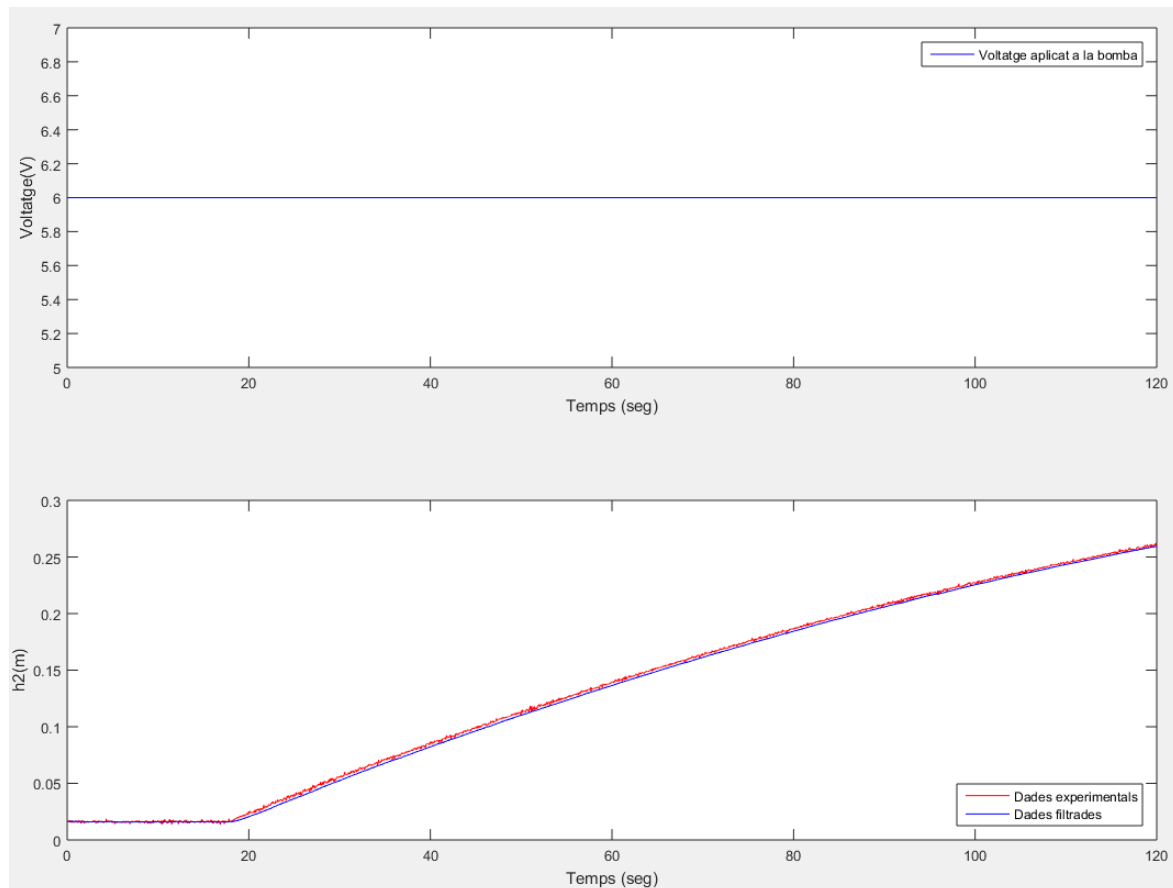
Per tal de desenvolupar un nou model que s'ajusti al comportament del sistema s'ha utilitzat un mètode estadístic basant en fer diverses experiències com la descrita amb anterioritat per a diferents voltatges aplicats a la bomba.

Adicionalment el nou model utilitzarà com a variable independent el voltatge aplicat a la bomba enlloc de la velocitat de rotació d'aquesta.

S'utilitzaran les dades d'altura obtingudes a partir de la lectura del sensor en els diversos experiments i aplicant la recta de regressió es faran servir per tal de aproximar les constants del model del corrent d'entrada utilitzant la funció de Matlab "fmincon". Funció que busca els mínims de un sistema de funcions no lineals multivariable.

Es realitza la experiència anteriorment descrita aplicant 4, 6, 8 i 10 V a la bomba P101. Els fitxers amb el resultats es poden trobar als annexos amb el nom del estil "CorbaBombaV4.txt" depenent del voltatge aplicat.

Un cop enregistrades les dades se sotmeten als mateixos tractaments que a l'apartat anterior. Per motius de claredat de visualització es representaran les dades experimentals de manera contínua.



Gràfic 5.8: Exemple del resultat del filtratge de les dades, aplicant 6V a la bomba

S'aplica un filtre discret per tal de millorar la imprecisió del sensor i posteriorment es remostrejen per tal d'analitzar les dades en l'apartat estacionari del experiment. Un cop fet aquest tractament es calcula el punt mig del nivell i la derivada centrada per a cada conjunt de dades corresponents per a cada experiència.

El model trobat que millor s'ajusta a les dades és:

$$q_i = \sqrt{\frac{k_X}{10^8 \cdot U(t)^2} - \frac{k_Y \cdot h_2(t) + k_Z}{10^8}} \quad (5.54)$$

Igual que en l'apartat anterior s'utilitzarà el valor de la derivada centrada de l'altura del tanc dos multiplicat per l'àrea per tal d'aproximar el corrent q_i i el punt mig de nivell equivalent per tal de representar h_2 en aquell instant.

De la mateixa manera que per al primer model es definirà l'expressió **(5.54)** com a expressió matemàtica en funció de les constants. Donant uns valors inicials a les constants, k_X , k_Y i k_Z , es compararà el valor generat per la funció en front de les dades experimentals i es minimitzarà aquesta diferència per tal d'establir la magnitud dels paràmetres específics del model.

Descrivint el model a Matlab, s'utilitza "fmincon" per trobar els valors de les constants pels quals l'error del càlcul de nivell del tanc superior (B102) és mínim en comparació a les dades obtingudes experimentalment.

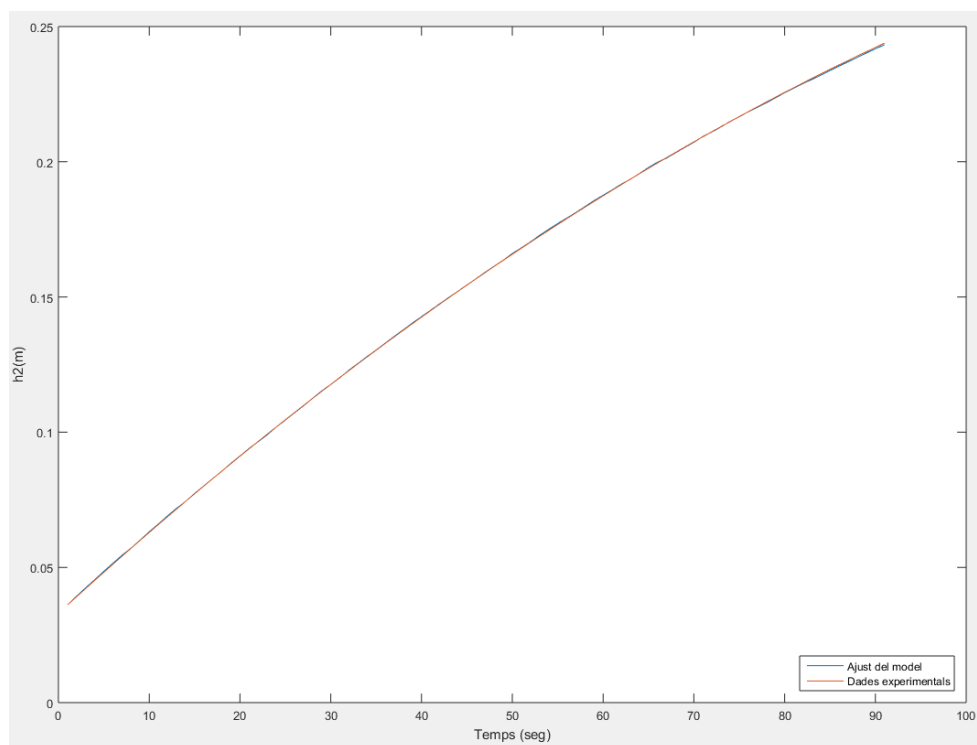
Els valors obtinguts per a les constants de l'expressió són:

$$k_X = 0,0407$$

$$k_Y = 3,4341$$

$$k_Z = 0,3734$$

Representant els valors obtinguts amb el model ja ajustat enfront de les dades obtingudes de l'experiment s'observa una bona correlació.



Gràfic 5.9: Comparació del model ajustat amb les dades experimentals aplicant 6V

El document amb aquestes dades té el nom "EstimacioKin.m"

5.2.2. Estació de pressió

Per tal de calibrar l'estació de pressió recuperarem l'equació (5.40) que ens defineix la funció de transferència generalista per a un sistema de segon ordre.

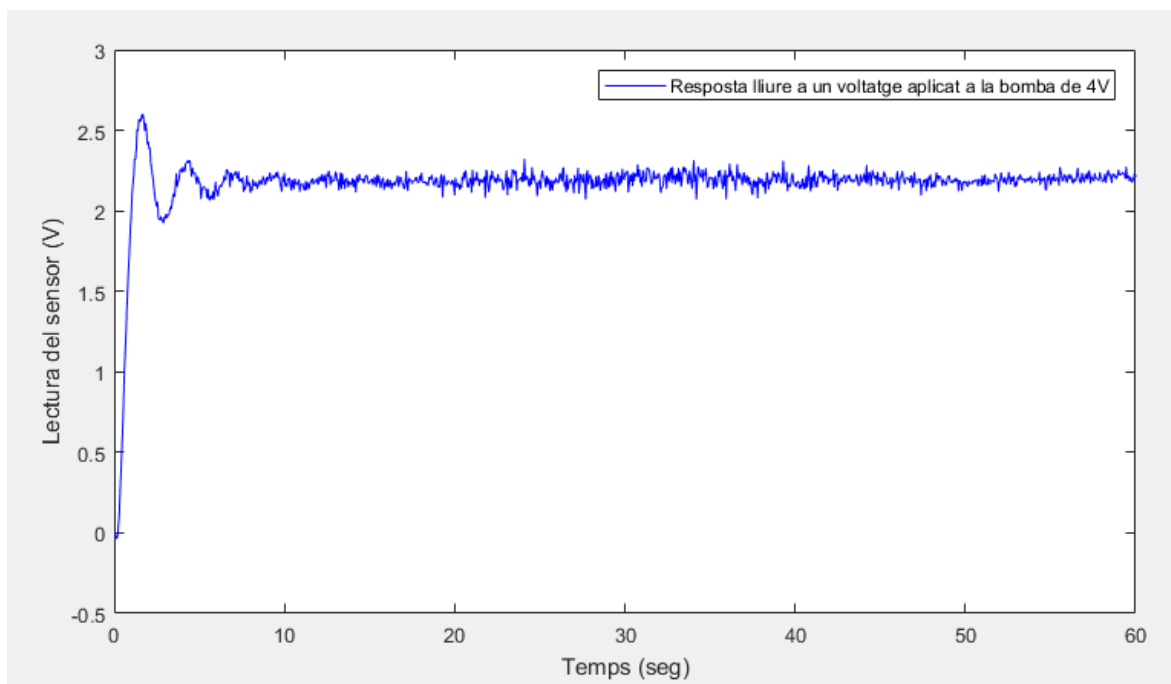
$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Al no disposar d'un sensor de nivell dins el tanc pressuritzat B303 ens complica determinar el volum dins el tanc ocupat per l'aigua de manera automàtica. Per tant ens servirem de aquesta expressió per tal de definir el sistema.

L'experiment a realitzar serà deixar establir el sistema fins a arribar a l'estat estacionari a diferents voltatges aplicats a la bomba. La configuració de les vàlvules serà la mateixa que la descrita en la Figura 4.12 i com ja s'ha comentat el nivell del tanc B301 ha de ser superior al del B303.

Utilitzarem les dades capturades del experiment per tal de ajustar els paràmetres de la expressió.

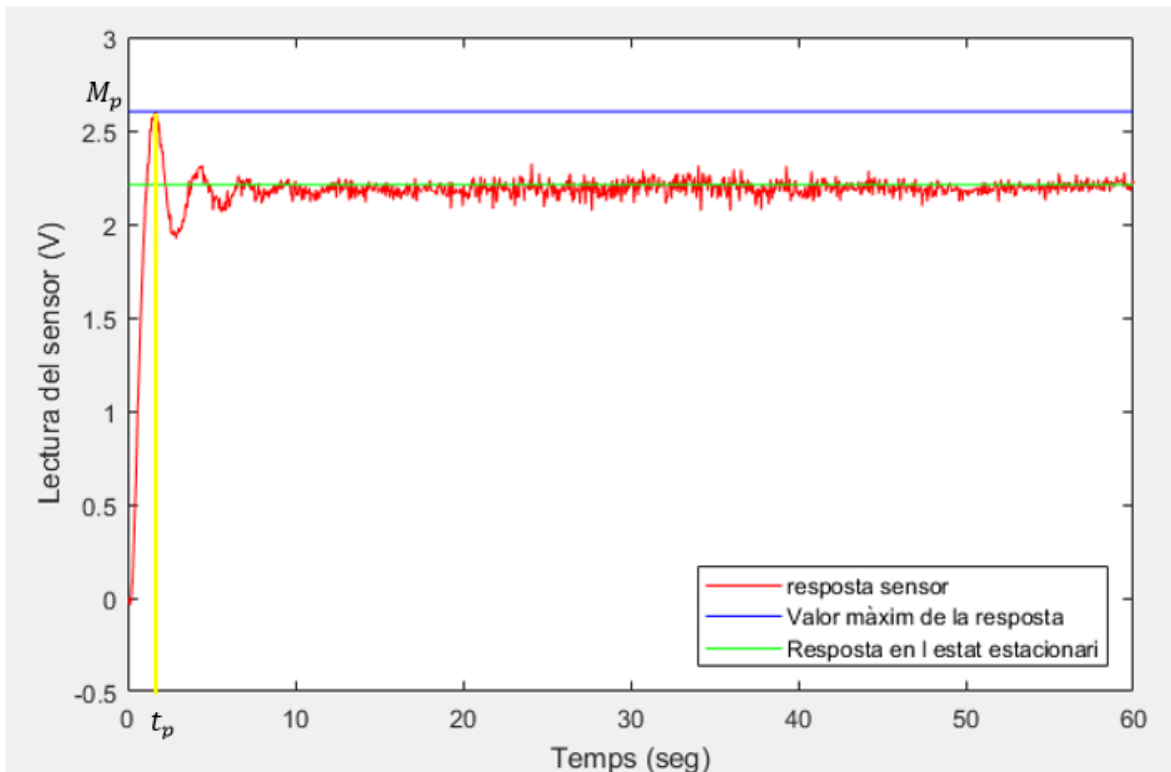
Fent servir les dades capturades aplicant un voltatge a la bomba de 4 V (Gràfic 5.10) calcularem els valors de sobre oscil·lació (M_p) i el temps de pic (t_p) que, respectivament, corresponen a la diferència entre el valor de la resposta màxima mesurat des de el valor al qual s'estabilitza el sistema i el temps en el qual la amplitud de la resposta del sistema és el valor màxim.



Gràfic 5.10: Resposta en llaç obert de l'estació de pressió a una entrada de 4 V

Utilitzant el programa Matlab es calculen els dos paràmetres per a les experiències realitzades.

Seguint amb l'exemple de 4V en la Gràfic 5.11 s'observen el valor màxim al que arriba la resposta i també el valor mitjà al voltant del qual s'estabilitza.



Gràfic 5.11: Visualització dels paràmetres M_p , t_p i valor en el qual s'estabilitza el sistema (Entrada de 4 V)

Amb els valor de sobre oscil·lació és calcularà el percentatge de sobrepas respecte el valor del sistema en l'estat estacionari amb la següent expressió

$$\% SP = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \cdot 100 \quad (5.55)$$

On $y(t_p)$ és el valor de la senyal del sensor en el temps de pic i $y(\infty)$ és el valor en l'estat estacionari.

Analitzant numèricament les dades per als experiments i calculant la mitjana entre els valors d'aquestes dues expressions s'obté:

$$\% SP = 12,93 \%$$

$$t_p = 1,8 \text{ s}$$

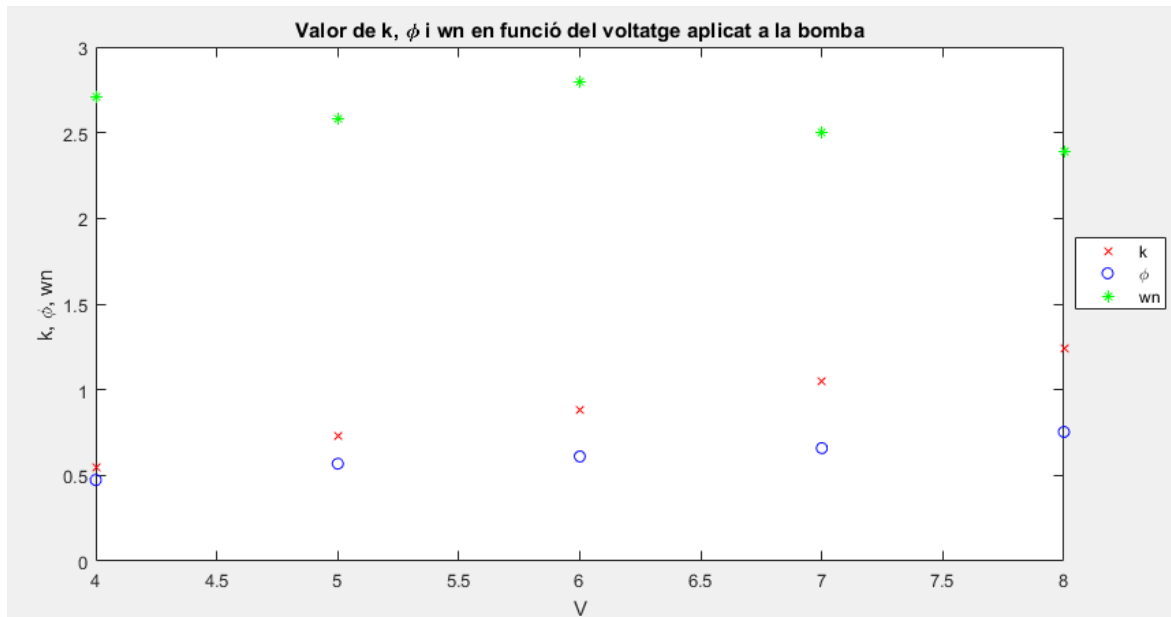
Amb aquestes dues dades extraurem la resta de constants de la equació seguint les següents expressions (5.56), (5.57) i (5.58).

$$k = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} \quad (5.56)$$

$$\xi = \frac{\ln(\% SP/100)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(\% SP/100)}} \quad (5.57)$$

$$\omega_n = \frac{\pi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \quad (5.58)$$

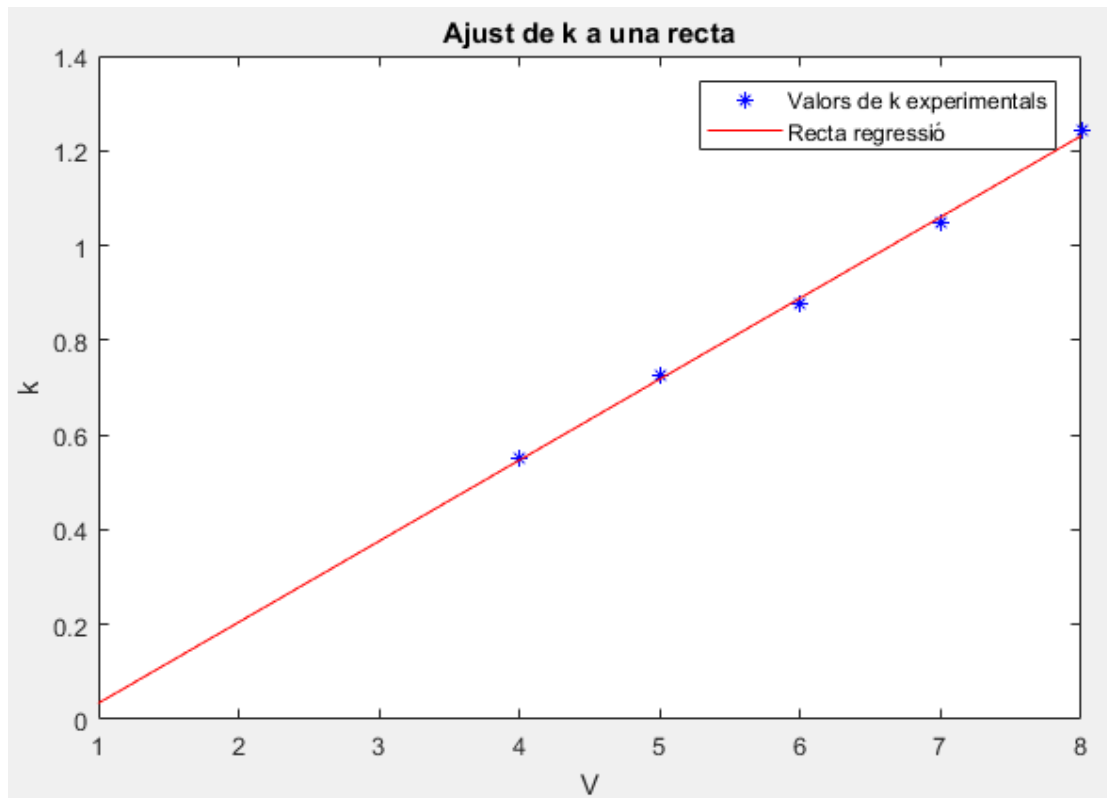
Amb les dades obtingudes amb anterioritat resulten els següents valors en funció del voltatge aplicat a la bomba:



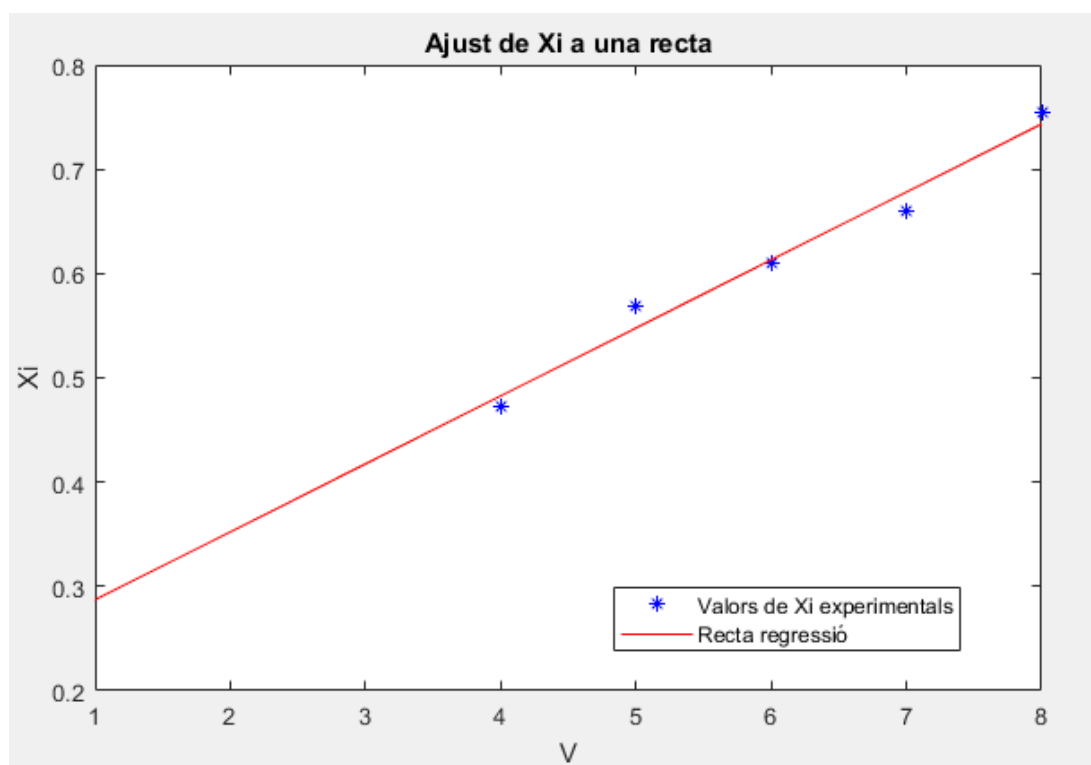
Gràfic 5.12: Valor de k , ξ (ϕ en el gràfic) i ω_n en funció del voltatge aplicat a l'entrada del sistema

S'observa que per a les variables k i ξ s'estableix una relació lineal amb el voltatge aplicat a la bomba P301. Es procedeix a calcular les seves corresponents rectes de regressió.

Per al guany del sistema, k :

Gràfic 5.13: Ajust lineal de els valors obtinguts per al guany del sistema (k)

Per al valor de la constant d'esmoreïment ξ (ξ en el Gràfic 5.14)

Gràfic 5.14: Ajust lineal de els valors obtinguts per a la constant d'esmoreïment del sistema (ξ)

Les equacions de les rectes trobades per a les dues constants són:

$$k(u) = 0,1711 \cdot u - 0,1370$$

$$\xi(u) = 0,0652 \cdot u - 0,2219$$

Sent u el valor d'entrada a la bomba P301 (V).

Per a ω_n és calcularà la mitjana aritmètica dels valors obtinguts

$$\omega_n = 2,70$$

Per tan un cop obtingudes les dades de les constants de l'equació de transferència ens la expressió **(5.40)** ens queda **(5.54)**:

$$G(s) = \frac{k(u) \cdot 7.29}{s^2 + \xi(u) \cdot 5,4s + 7.29} \quad \textbf{(5.59)}$$

En el següent apartat de la simulació del model es comentarà com queda aquesta funció de transferència encaixada dins del model de la estació i es compararà la resposta real del sistema a diferents entrades amb els resultats obtinguts per la simulació.

5.3. Simulació del model

5.3.1. Simulació de l'estació de nivell

Per tal de simular l'estació de nivell crearem un diagrama de blocs utilitzant la expressió redefinida en l'apartat d'ajust del model de l'estació que ens descriu el comportament del sistema.

En la Figura 5.7 es pot veure el diagrama de la simulació que ens mostrarà la resposta del sistema (la variable a controlar h_2) enfront de el voltatge d'entrada aplicat.

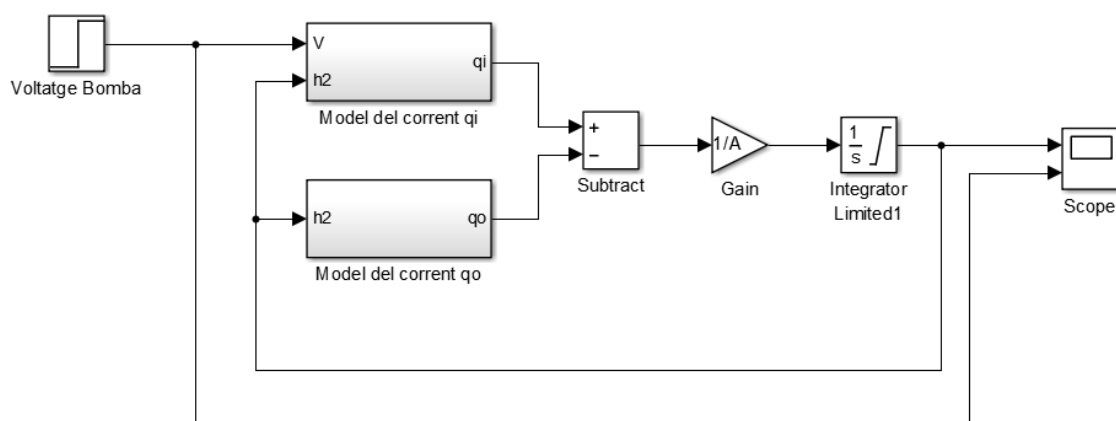
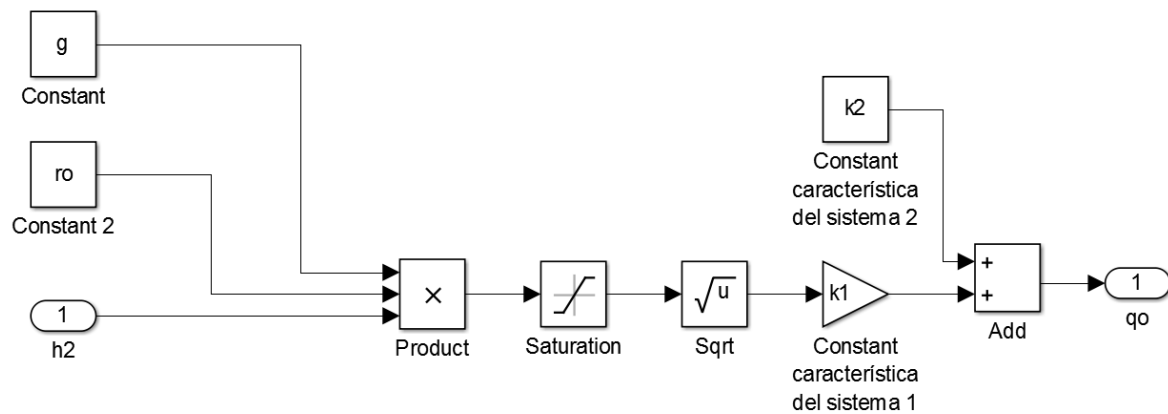


Figura 5.7: Diagrama general de la simulació

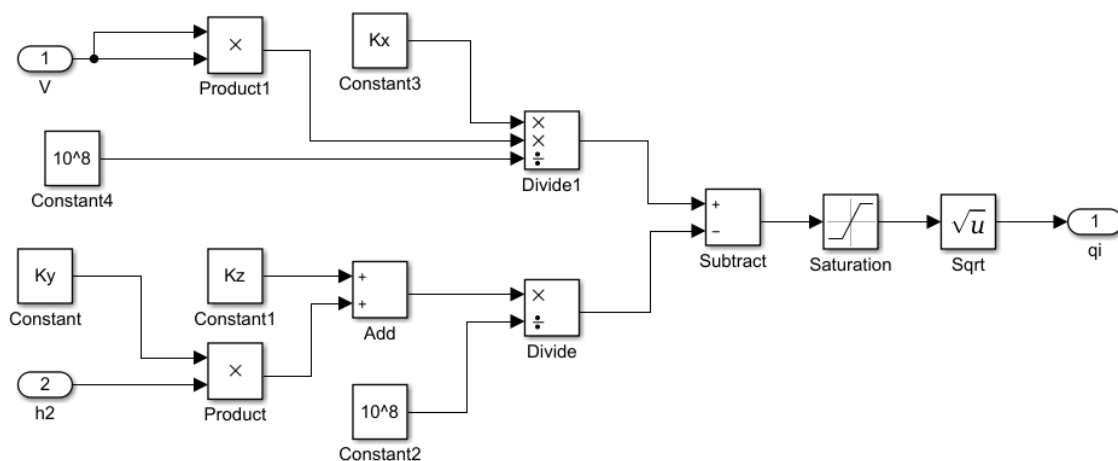
Dins els blocs que ens defineixen els corrents q_o i q_i s'hi troben les expressions **(5.51)** i **(5.54)** de l'apartat 5.2.1 definides en el simulink tal i com es mostra en la Figura 5.8 i la Figura 5.9.

Les saturacions prèvies a les operacions d'arrel quadrada ens asseguren que no s'obtenen negatius i per tan s'exclouen les solucions complexes de la simulació.

Figura 5.8: Simulació del model per el corrent q_o

Com a entrades només es té h_2 , l'altura del tanc B102 (m). Com a constants hi han g , l'acceleració de la gravetat (9.81 m/s^2), ro és la densitat de l'aigua (1000 kg/m^3) i k_1 i k_2 constants inherent en el sistema relacionada amb les pèrdues de càrrega en el tub de retorn i amb l'alçada mínima per la qual hi ha corrent, respectivament. Descrites en l'apartat del model del corrent de retorn del tanc B102.

Com a única sortida s'obté el corrent q_o (m^3/s).

Figura 5.9: Simulació del model per el corrent q_i

Com a constants hi han K_x , K_y i K_z són constants inherents al sistema relacionades amb les pèrdues de càrrega en els conductes i la bomba definides en l'apartat de calibratge.

Com a única sortida s'obté el corrent q_i (m^3/s).

Amb el model complet es crea un fitxer Matlab adicional anomenat “constantssimulació.m” a on es fixen els valors de les constants dels sistemes trobades en l'apartat d'ajust.

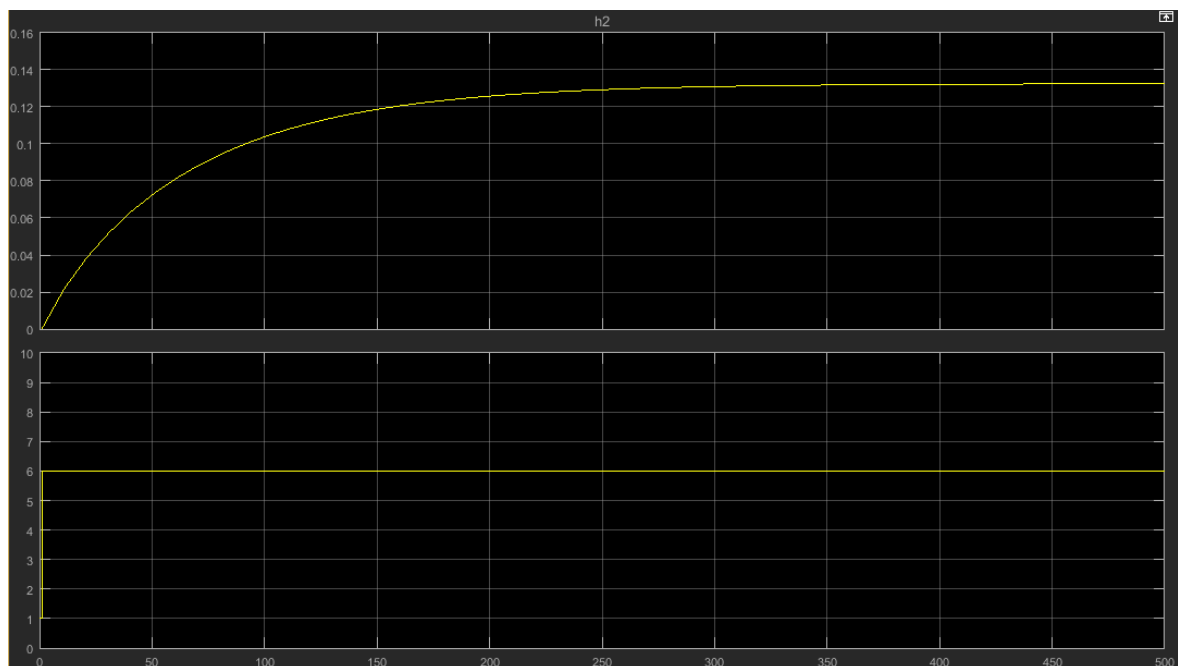
```

1 - clear all
2
3 - A=0.0323;
4 - Kx=0.0407;
5 - Ky=3.4341;
6 - Kz=0.3734;
7 - k1=1.83*10^(-6);
8 - k2=1.38*10^(-5);
9 - g=9.98;
10 - ro=1000;
11
12 - Simulacio_Nivell
13 |

```

Imatge 1: Definició de les constants de simulació a Matlab

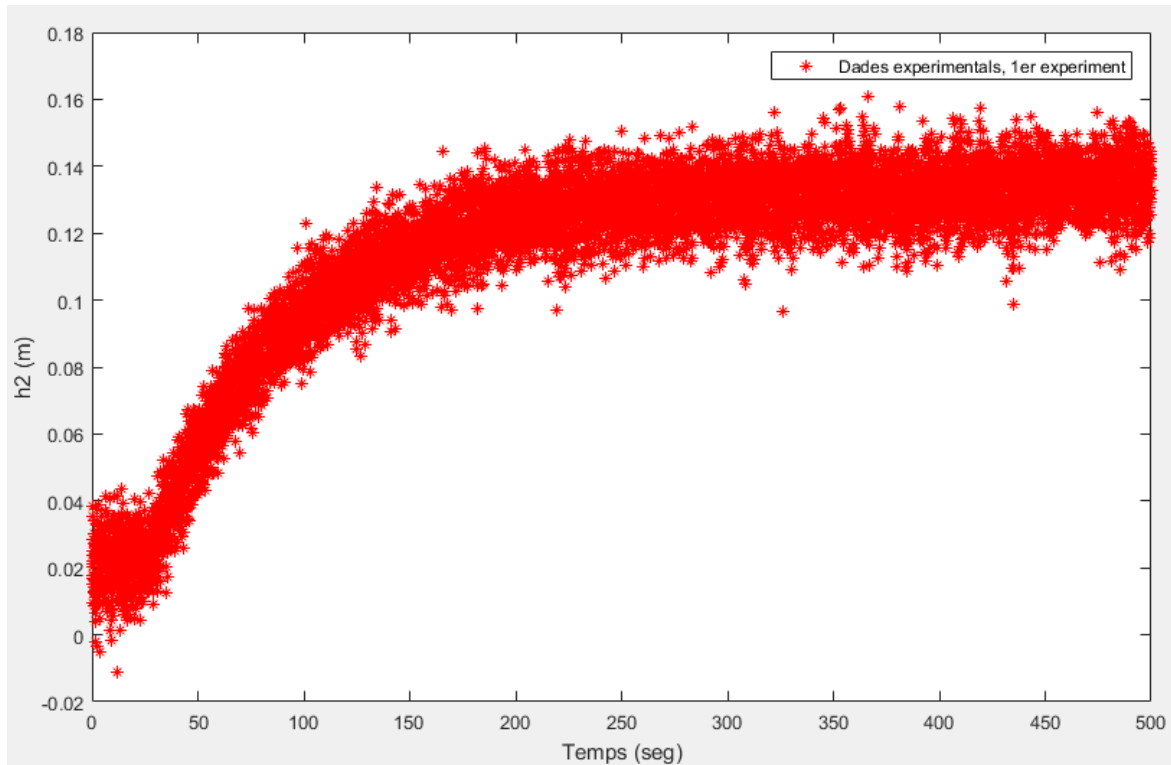
Aquest mateix fitxer ens crida l'arxiu de la simulació del model. L'executem prement el “Run” i visualitzant el Scope podem veure la resposta al llarg de el temps per el valor de h_2 juntament amb el voltatge assignat a la bomba.



Gràfic 5.15: Resultats del nivell simulat amb una entrada de 6V

Per tal de validar que el resultat de la simulació és vàlid es realitzarà un experiment en l'estació amb les mateixes condicions que la simulació. Es a dir per al cas anterior un voltatge aplicat a la bomba de 6 V i durant 500 segons.

Es recolliran les dades amb el procediment habitual i es sotmetran a un filtre discret amb un valor $\alpha = 0,95$. Es realitza l'experiment per triplicat i es calcula la mitjana dels valors obtinguts.



Gràfic 5.16: Dades d'altura al llarg del temps de la primera experiència, sense filtrar

Com es pot observar en el Gràfic 5.16 en aquesta experiència hi ha molt de soroll present en la lectura del sensor en comparació a les altres proves realitzades durant la fase de calibratge.

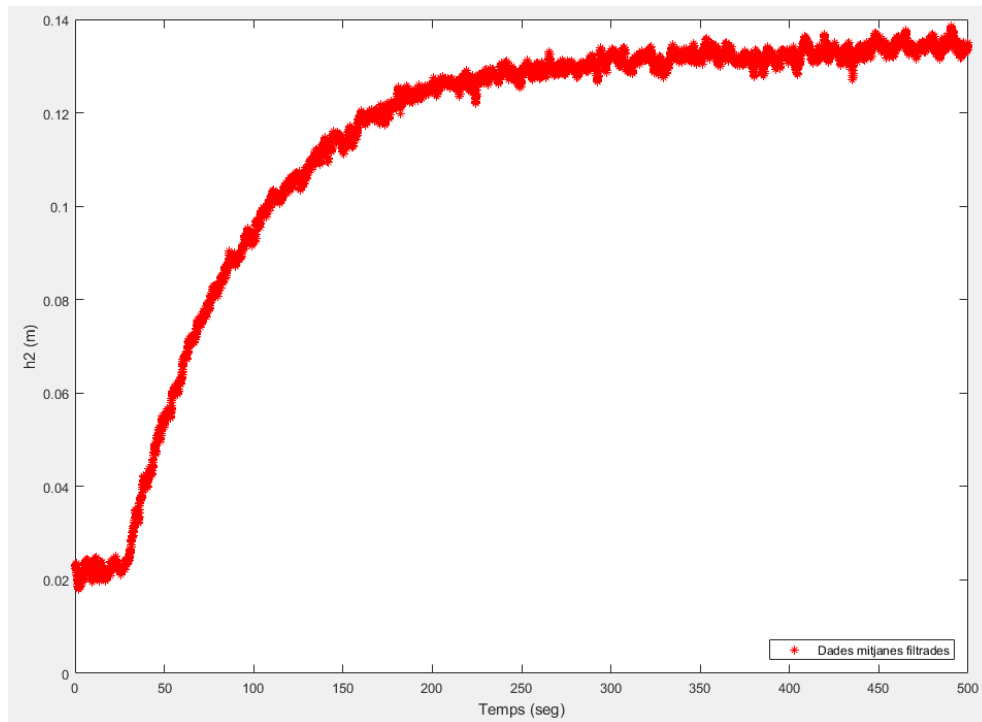
Això pot ser explicat per el moviment en la superfície de l'aigua del tanc B102. En tots els experiments previs només hi havia una de les dues canonades que connecten amb aquest obertes.

En el cas del calibratge del corrent de retorn (q_o) es mantenia la vàlvula V102 tancada la i vàlvula V101 d'accés al tanc oberta fins que el tanc era ple. Un cop completat aquest pas s'obria la V102 i simultàniament començava l'enregistrament de dades.

Per el corrent d'entrada (q_i) es mantenia la vàlvula V102 tancada, V101 oberta i s'enregistrava tan bon punt s'activava la bomba.

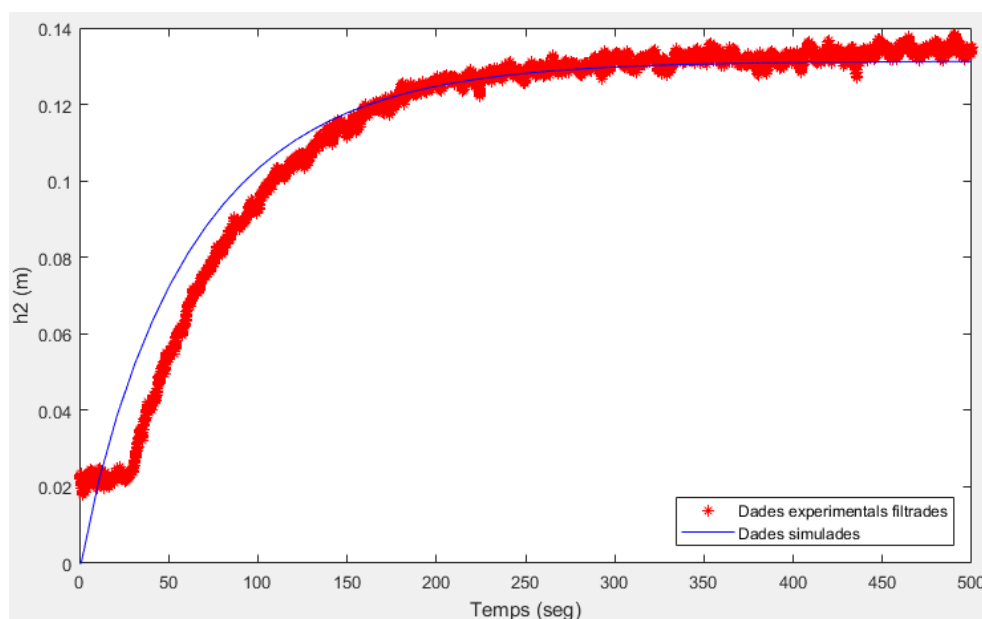
Per aquets motius no s'arribaven als nivells de soroll que s'aprecien en aquest cas ja que el canvi de nivell de l'aigua era en tot moment molt més gradual.

Per tal de fer les dades més fiables s'aplicarà un segon filtre discret amb el resultat que es pot observar en el Gràfic 5.17.



Gràfic 5.17: Dades mitjanes dels tres experiments filtrades per duplicat.

Comparant la mitjana dels valors de les experiències amb el resultat de la simulació amb les mateixes condicions (voltatge aplicat i duració del experiment) s'observa:



Gràfic 5.18: Comparació entre els resultats de la simulació i el comportament real de l'estació

Com es veu en el Gràfic 5.18 el sistema té un retard que no està incorporat en la simulació. Addicionalment l'experiència comença sempre amb un nivell de l'aigua h_2 al voltant de 2 cm. Aquest fet es deu a l'aigua que queda al fons del tanc després del buidatge. El posicionament de el conducte de retorn no permet evacuar tota l'aigua.

Per modificar la simulació introduïrem un retard de 25 segons en el sistema i un valor inicial d'altura de 2 cm. La nova estructura de la simulació es pot observar en la Figura 5.10.

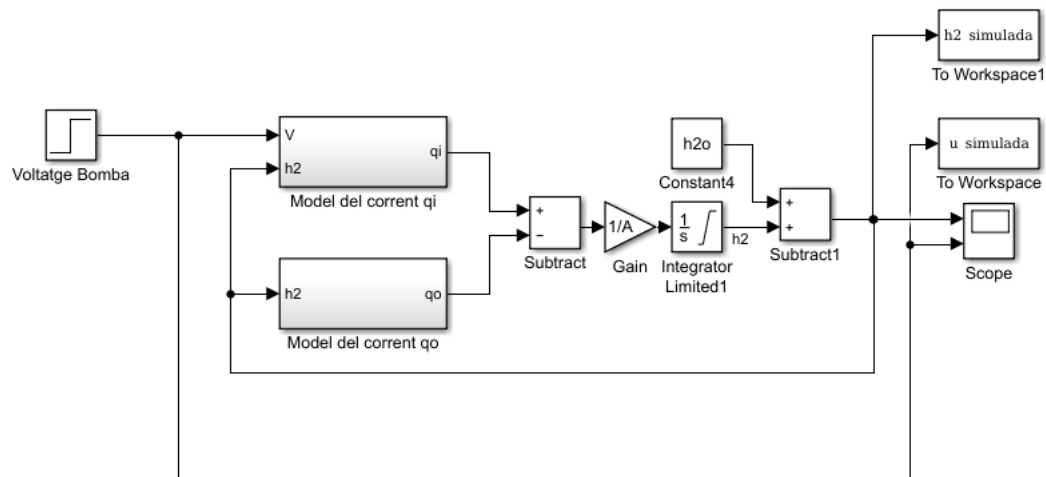
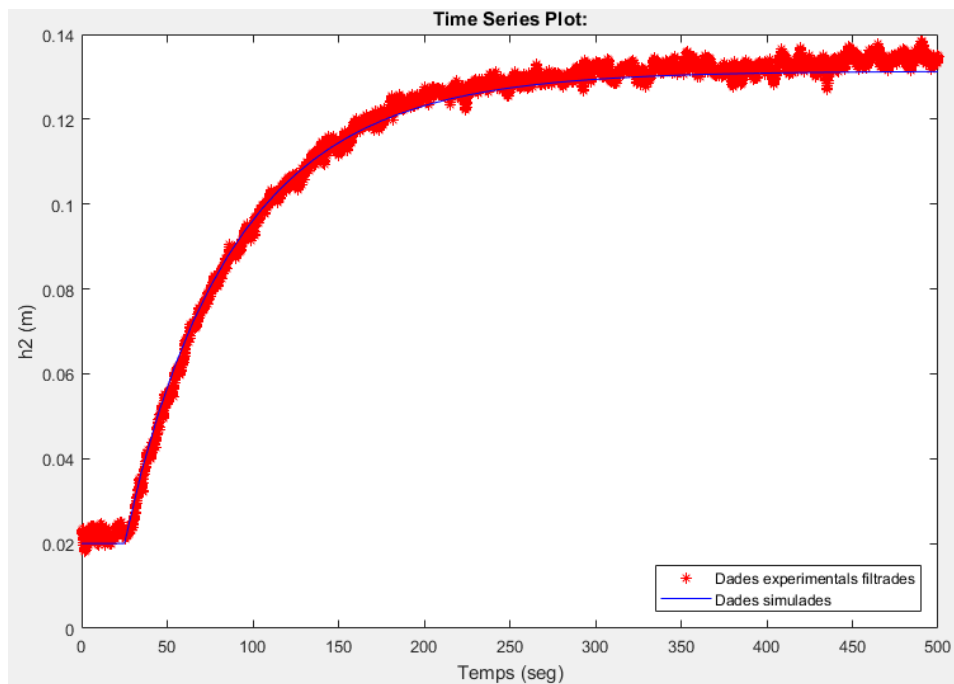


Figura 5.10: Estructura de la simulació final

Després de corregir les mancances anteriorment esmentades la comparació ens resulta:



Gràfic 5.19: Comparació amb la simulació ajustant el retard i el valor inicial de nivell

S'observa una bona representació de la tendència del sistema.

5.3.2. Simulació de l'estació de pressió

Recuperant la expressió **(5.40)** que ens defineix la funció de transferència del sistema

$$G(s) = k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.40)$$

Crearem un model de simulació al Simulink juntament amb els valors de les variables trobats en l'apartat 5.2.2 de calibratge de l'estació de pressió.

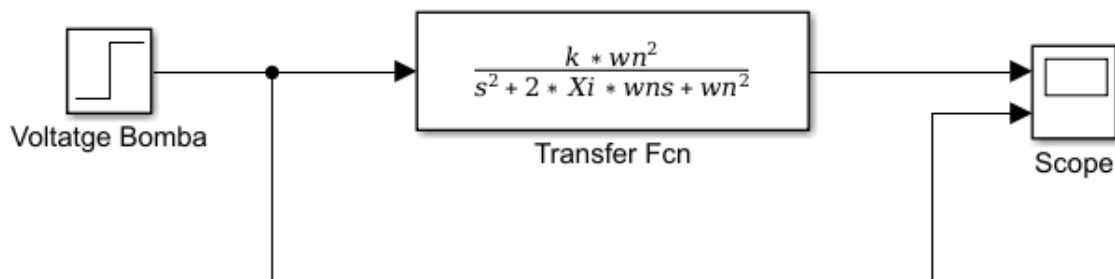
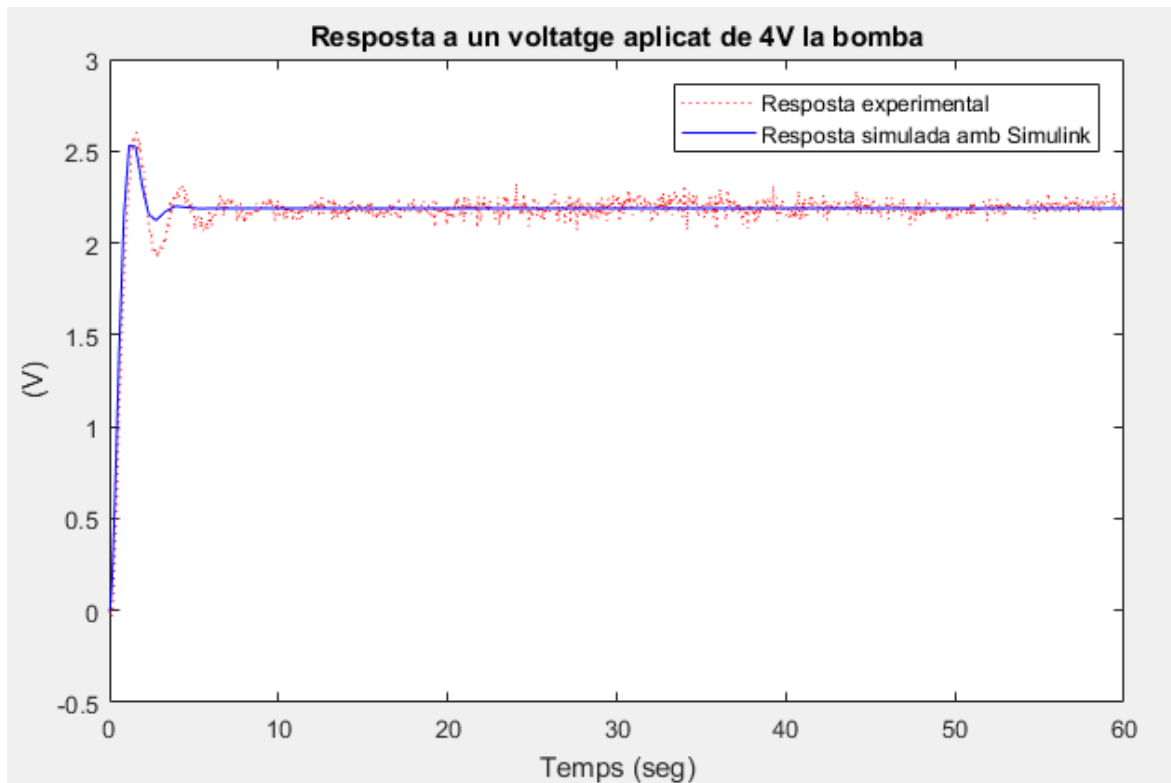


Figura 5.11: Diagrama de blocs de la simulació per al model de la estació de pressió

A través d'un fitxer Matlab introduïm les dades trobades en l'apartat de calibratge per les variables de la funció de transferència.

Per al cas de 4V que hem fet servir com ha exemple si comparem els resultats de la simulació amb els obtinguts experimentalment



Gràfic 5.20: Comparació entre les dades generades per la simulació de Simulink i les enregistrades durant l'experiment aplicant 4V d'entrada a la bomba P301

5.4. Controladors

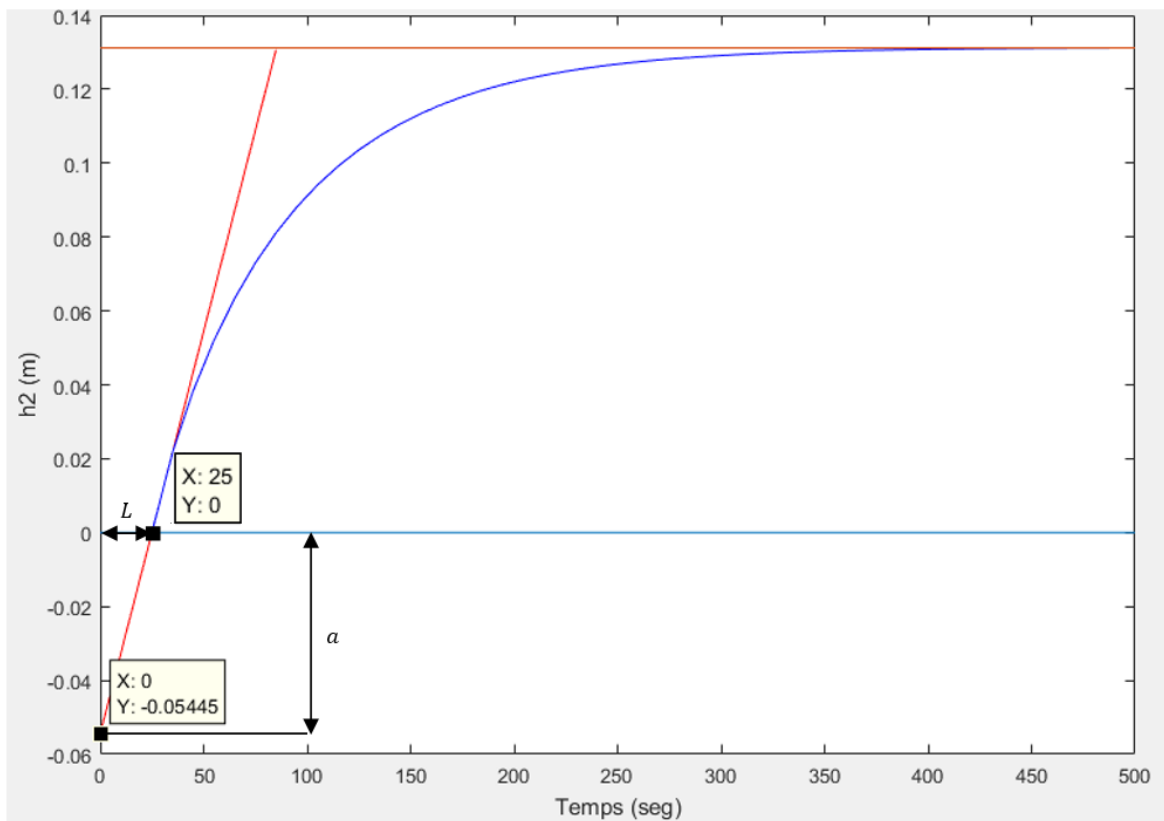
Per tal de visualitzar amb més claredat l'efecte dels diferents controladors es realitzen diferents experiències amb diversos tipus de controlador i diferents constants.

5.4.1. Controladors estació de nivell

Per calcular empíricament els controladors en llaç obert seguirem el mètode de Ziegler Nichols de resposta a una entrada graó. Cal notar que el mètode Ziegler Nichols treballa amb la equació ideal del PID que té la forma:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (5.40)$$

Utilitzant la gràfica de la resposta del sistema a una entrada graó de 6V per a la bomba:



Gràfic 5.21: Determinació dels termes a i L per al mètode càlcul empíric de controladors de Ziegler Nichols. En blau la resposta del sistema simulada, en blau flux 0, en taronja la resposta màxima del sistema i en vermell recta tangent a la resposta.

Un cop determinats el retard (L) i la constant de (a) en que la recta talla el eix vertical, que per el nostre sistema en concret seran **(5.60)**, procedirem a calcular els controladors seguint la Taula 1.1.

$$L = 25 \text{ s} \quad a = 0,05445 \text{ m}$$

(5.60)

Taula 1.1: Càlcul empíric de les constants per als controladors en llaç Obert per el mètode de Ziegler Nichols

Tipus de controlador	K_p	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4 \cdot L$
PI	$0,9 \cdot a$	$3 \cdot L$		$5,7 \cdot L$
PID	$1,2 \cdot a$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$	$3,4 \cdot L$

Per al nostre cas s'obté:

Taula 5.1: Resultat de les constants per al càlcul de controladors en llaç obert per a la estació de nivell

Tipus de controlador	K_p	T_i	T_d
P	18,37		
PI	16,53	75,00	
PID	22,04	50,00	12,50

Un cop calculats els valors del controlador es procedirà a veure quins resultats dona a la planta primer mitjançant la simulació i finalment experimentalment.

El diagrama de blocs amb el feedback i el bloc del controlador que serà utilitzat en totes les experiències amb els diversos tipus de control té la forma que es pot apreciar en la

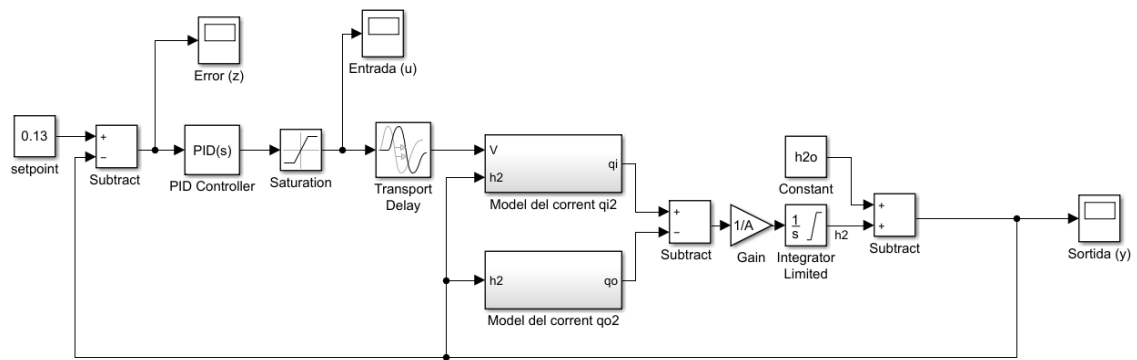
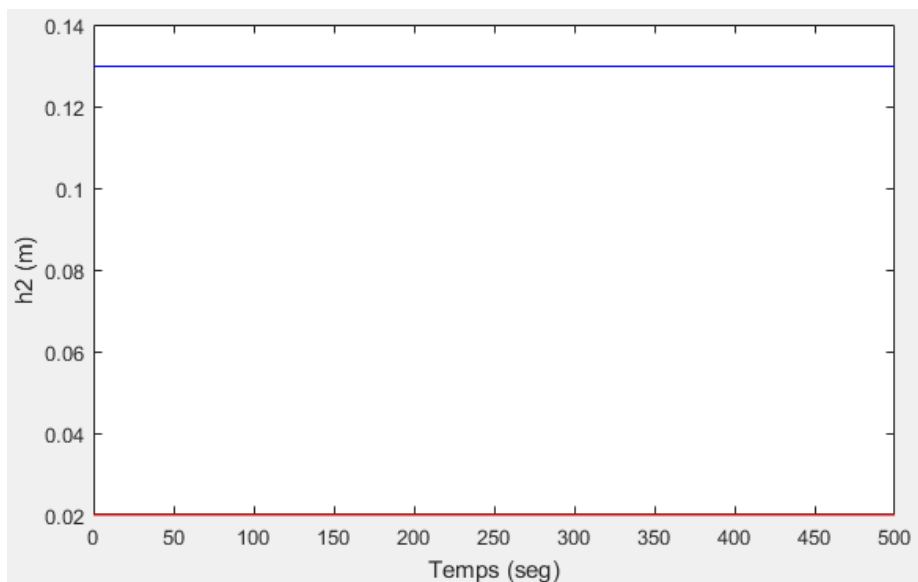


Figura 5.12: Diagrama de bloc per al control de la estació de nivell en estructura *feed back*. Els valors per el PID seran modificats en funció dels resultats de la sintonia i del tipus de controlador que es vulgui per a l'estació. En l'exemple en concret el *set point* és de 0,13 m d'alçada, l'error (z) és la diferència entre el *set point* i la sortida (y) del sistema i l'entrada (u) és el senyal d'entrada al sistema un cop el controlador ha avaluat la senyal d'error. La saturació just després del PID és necessària per tal d'assegurar que l'entrada esta dins el rang de la bomba (de 10V a -10V).

5.4.1.1. Controlador P

Per un sistema de primer ordre amb retard com el de nivell no s'esperen grans resultats amb un controlador proporcional pur. Aquest fet es veu reforçat per la magnitud de les variables comparades. Al treballar en mil·límetres la magnitud del error resulta petita, això ens pot portar problemes a la hora de veure una efecte clar del controlador.

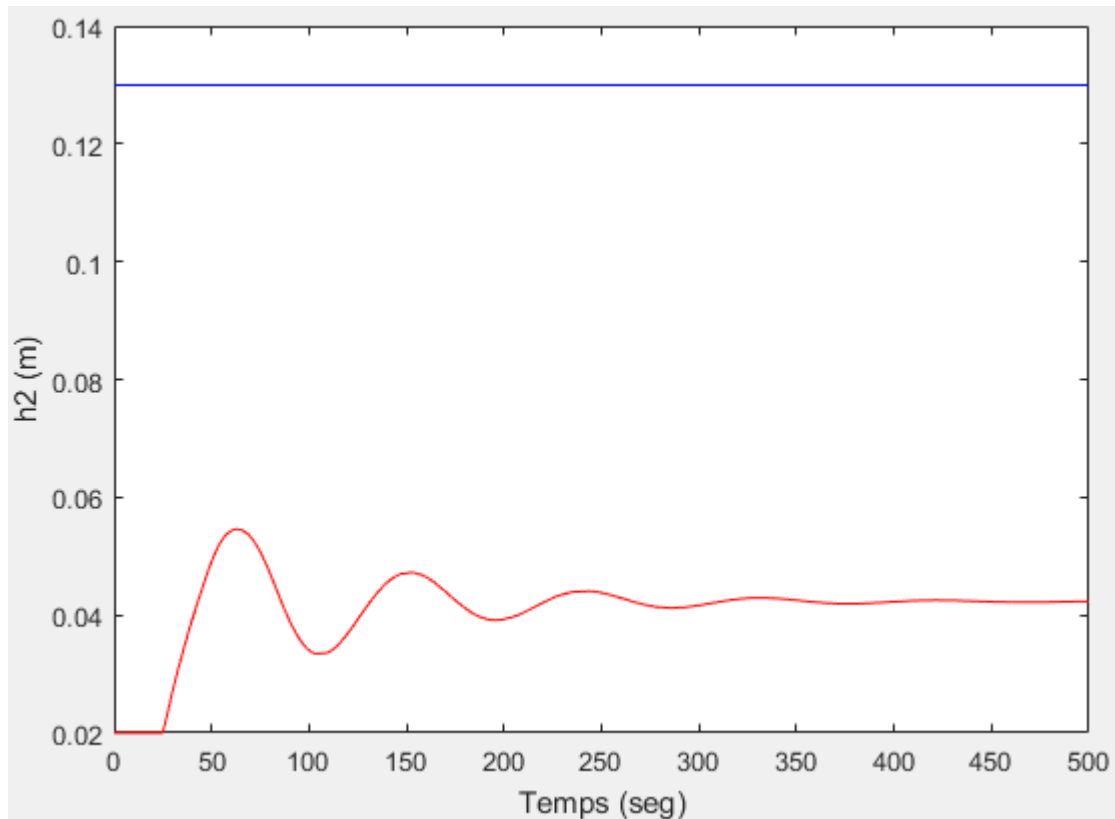
Amb els resultats pera K_p trobats amb el mètode de l'entrada graó a la simulació s'obté.



Gràfic 5.22: Representació de el valor de *set point* (en blau) enfront de la resposta simulada del sistema amb el controlador P (en vermell). No s'observa cap canvi al sistema fent servir el guany resultant per el mètode de l'entrada graó. El valor de la és $K_p = 18,37$.

El fet de que el sistema amb el control no presenti cap resposta es donat per la magnitud de les dades amb que es treballa. Com ja s'ha comentat la senyal d'error és tant petita que pràcticament no provoca cap canvi.

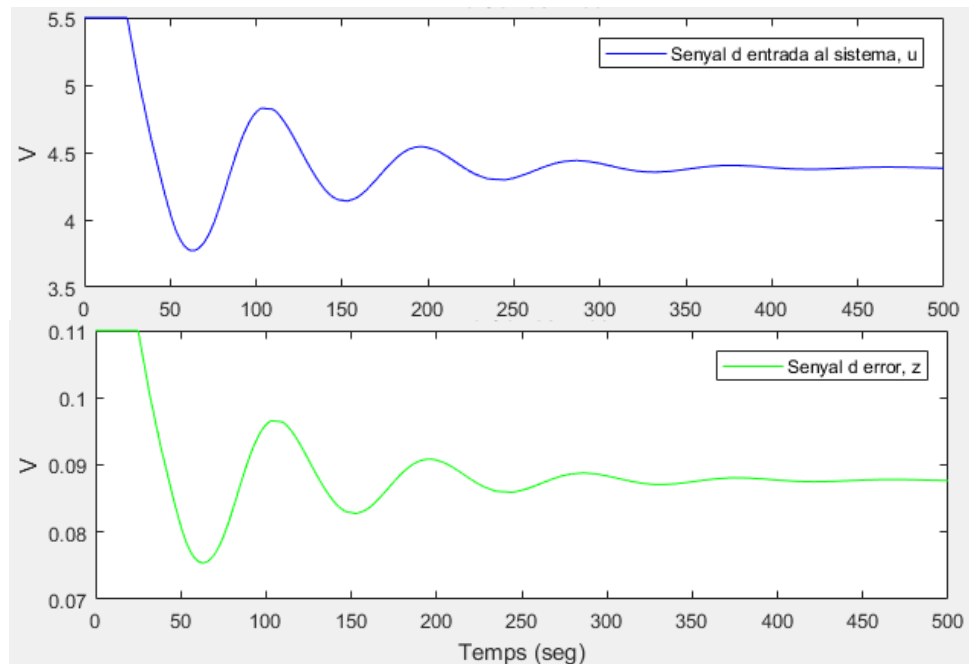
Si en canvi provem un valor més gran per a K_p com per exemple 50.



Gràfic 5.23: Representació de el valor de *set point* (en blau) enfront de la resposta simulada del sistema amb el controlador P (en vermell) amb un valor de K_p de 50.

En aquets cas si que es pot observar una resposta del sistema amb el controlador. Tot i així s'observa un gran error d'estat ja que el nivell queda molt lluny del set point de 0,13 metres.

Per a aquesta simulació la senyal d'entrada al sistema i la d'error van ser:



Gràfic 5.24: Comparació entre el senyal d'entrada al sistema (blau) amb el senyal d'error generat entre la comparació del *set point* i la resposta del sistema.

Comparant les dues senyals s'observa clarament el comportament del efecte proporcional. L'única acció del controlador és la d'augmentar la senyal proporcionalment a la magnitud de la senyal del error (z).

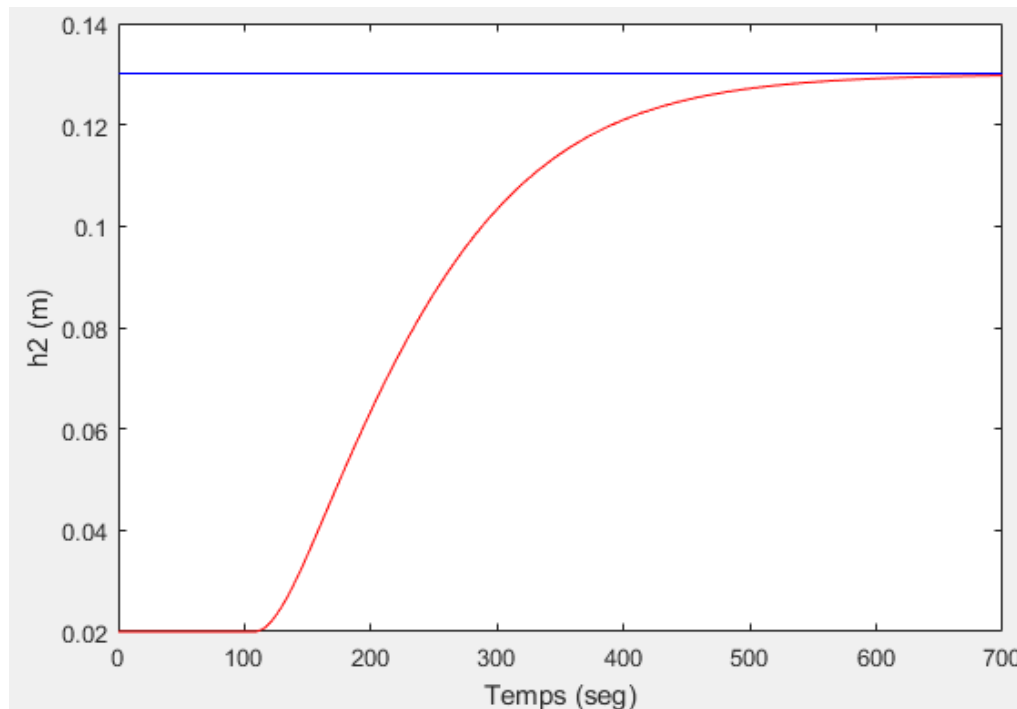
Tot i que s'ha millorat el resultat de la resposta amb el control augmentant el guany del controlador un controlador P simplement no és capaç de efectuar un bon control a causa de l'error d'estat. Per valors de P majors el sistema es desestabilitza i comença a oscil·lar.

5.4.1.1. Controlador PI

Per al controlador PI s'espera un molt millor comportament que per al P gracies a l'acció integrativa que permet eliminar l'error d'estat i arribar a una desviació z molt pròxima a zero.

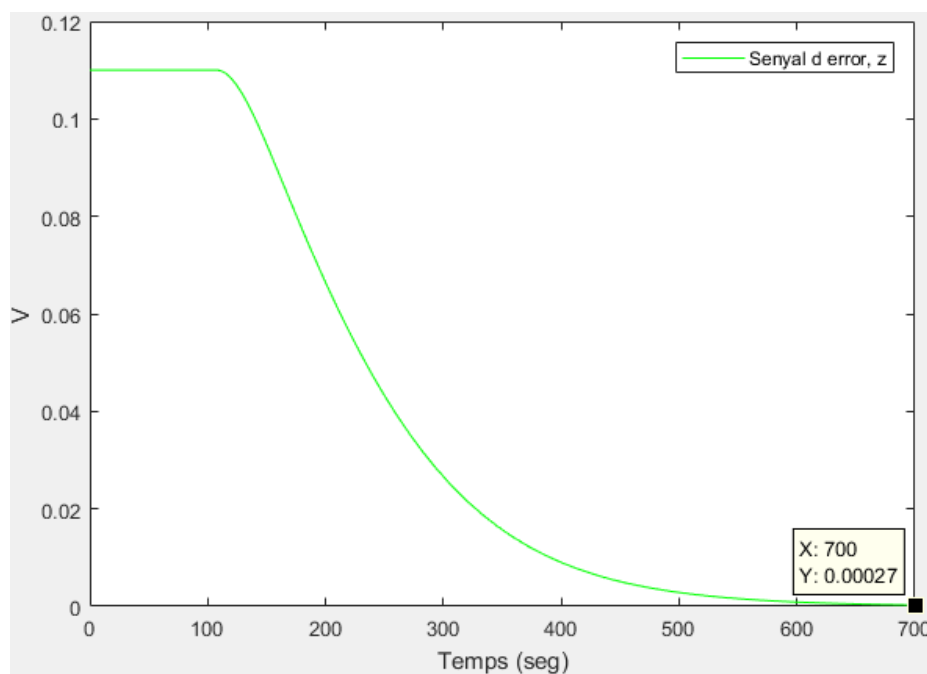
Introduint les variables trobades per el mètode de la resposta graó de Ziegler Nichols a la simulació obtenim el Gràfic 5.25.

La resposta generada per aquest controlador aconseguix un error de 0 cal notar que introdueix un retard en el sistema bastant gran. Depenent de la necessitat per el procés en qüestió podria ser necessari reduir aquest temps de resposta



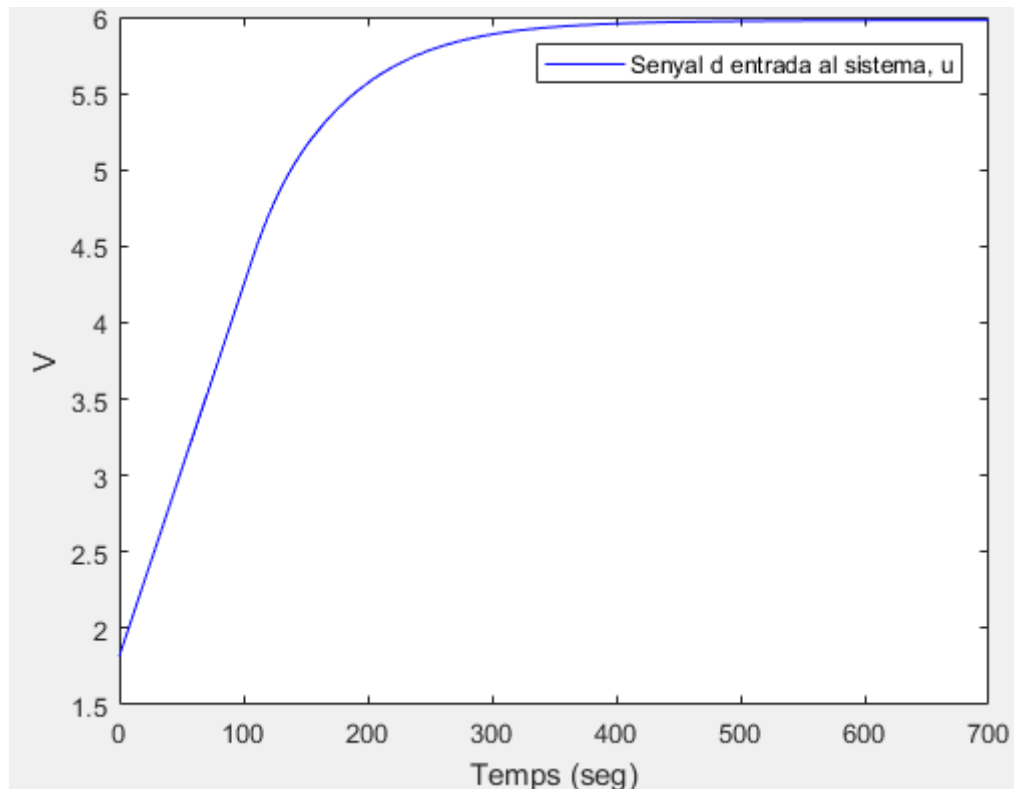
Gràfic 5.25: Representació de el valor de *set point* (en blau) enfront de la resposta simulada del sistema amb el controlador PI (en vermell). Els valors de K_p i T_i utilitzats per al control són 16,53 i 75 s respectivament.

Fixant-nos en la senyal d'error podem veure que per a un temps gran s'aproximà a zero.



Gràfic 5.26: Representació de l'evolució de la senyal d'error al llarg del temps per el controlador PI amb els valors $K_p = 16,53$ i $T_i = 75s$. Per $t = \infty$ aquesta tendeix a zero gràcies a l'acció integradora.

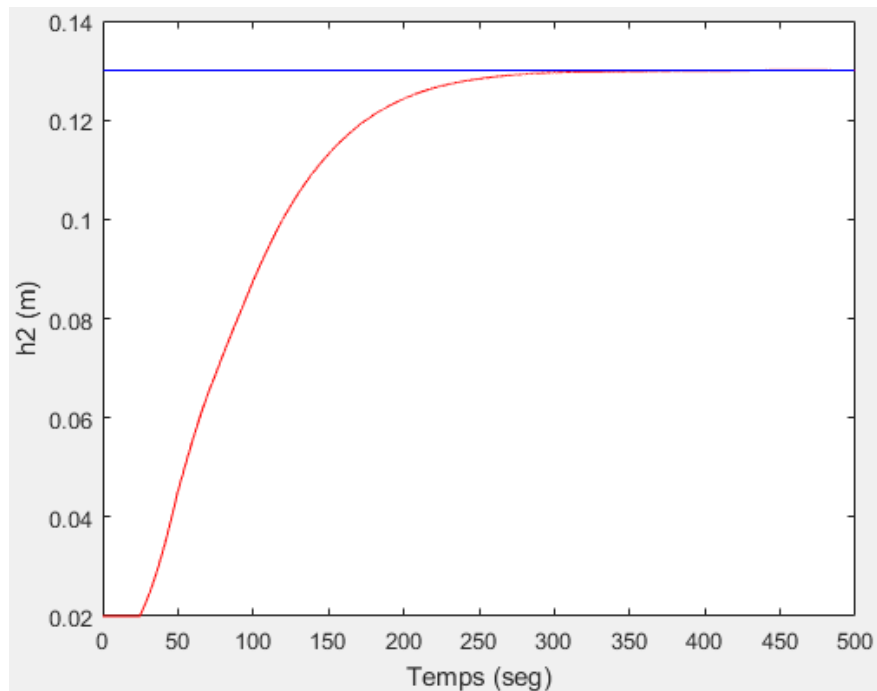
Com es d'esperar també veiem que la senyal d'entrada al sistema acaba sent d'uns 6 V en l'estat estacionari. Aquest voltatge es correspon amb l aplicat experimentalment per tal d'aconseguir un nivell de 0,13 m.



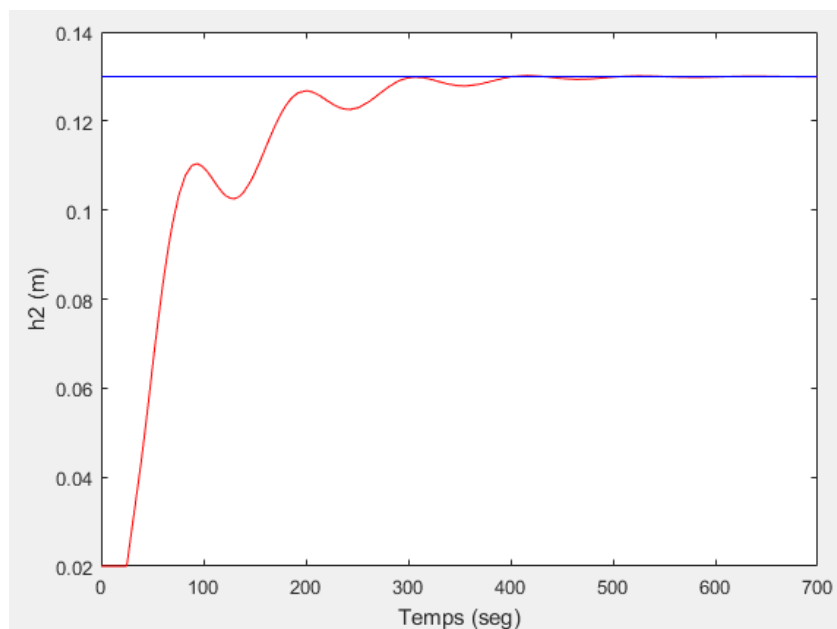
Gràfic 5.27: Senyal d'entrada generat per el controlador PI amb els valors $K_p = 16,53$ i $T_i = 75s$ a partir de la senyal d'error.

En la eventualitat de que necessitéssim un millor temps de resposta es podria millorar augmentant la constant K_p del efecte proporcional a 35. Amb aquesta modificació s'observa una gran millora en el temps de resposta.

Per a valors més grans de K_p el sistema comença a perdre estabilitat i apareix el fenomen de la oscil·lació.



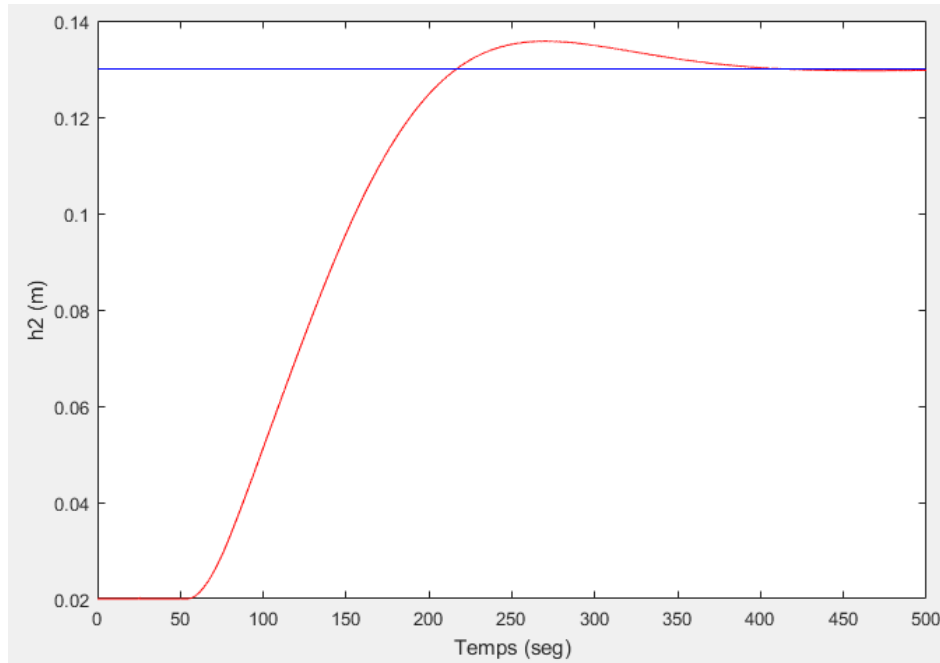
Gràfic 5.28: Representació de la resposta simulada del sistema amb el controlador PI (en vermell) enfront el *set point* (en blau). Els valors de K_p i T_i utilitzats per al control són 35 i 75 respectivament. S'observa una gran millora en el temps de resposta enfront del controladors amb els valors resultants de Ziegler Nichols.



Gràfic 5.29: : Representació de la resposta simulada del sistema amb el controlador PI (en vermell) enfront el *set point* (en blau). Els valors de K_p i T_i utilitzats per al control són 50 i 75 respectivament. Tot i que el temps de resposta esdevé pràcticament igual al del sistema s'observa l'aparició de oscil·lacions i sobre pics, gens desitjables des de el punt de vista del control.

5.4.1.2. Controlador PID

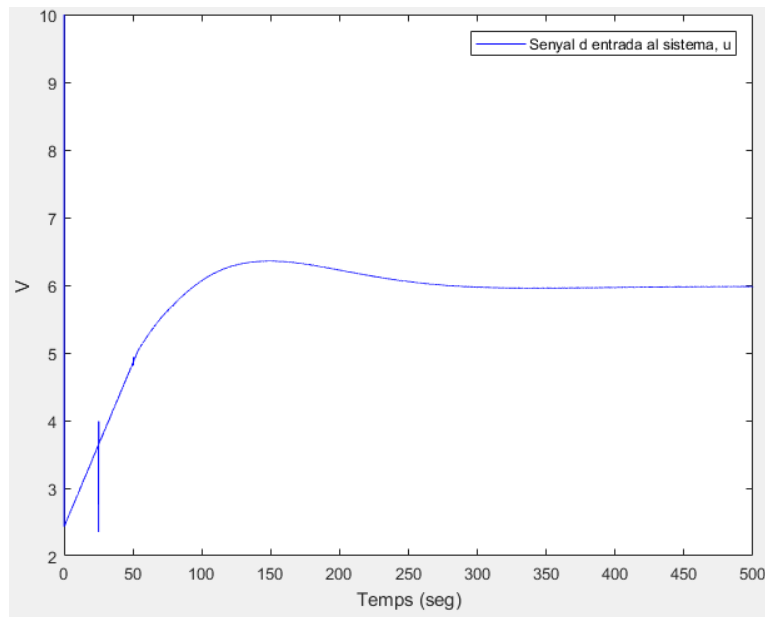
Introduint els valors obtinguts per el mètode de l'entrada graó de Ziegler Nichols al controlador s'obté.



Gràfic 5.30: Representació de la resposta lliure simulada del sistema (en blau) enfront de la resposta amb el controlador PID (en vermell). Els valors de les constants del PID són $K_p = 22,04$, $T_i = 50\text{ s}$ i $T_d = 12,5\text{ s}$.

D'entrada s'observa un control amb un temps de resposta més ràpid que el del control PI tot i que també ens apareix un sobre pic al voltant dels 250 segons.

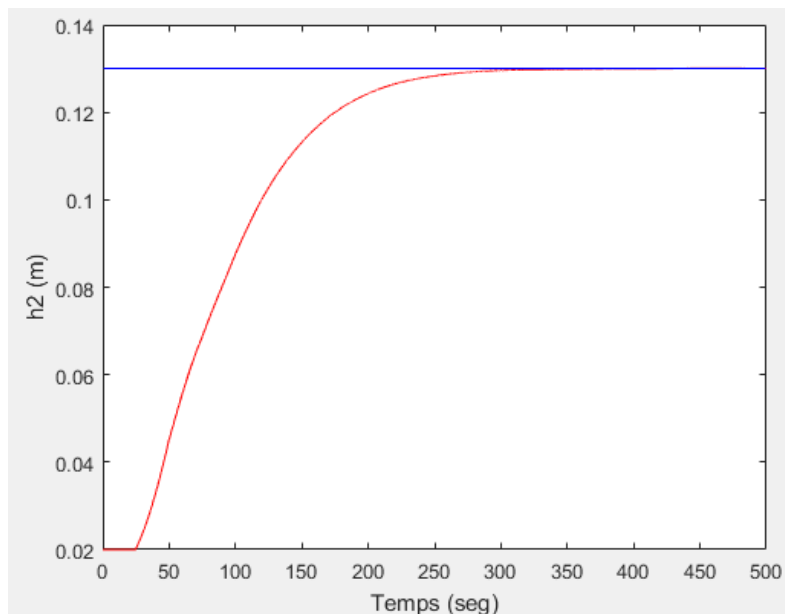
Si observem la senyal d'entrada al sistema es veu amb claredat l'efecte del derivatiu que ens provoca que ens els primers instants s'apliqui el voltatge màxim possible per a la bomba.



Gràfic 5.31: Senyal d'entrada generat per el controlador PID amb els valors $K_p = 22,04$, $T_i = 50$ s i $T_d = 12,5$ s. Per els primers instants el senyal és màxim degut al efecte del control derivatiu

Acabant de sintonitzar el controlador manualment podem millorar el temps de resposta. Incrementant el guany del controlador P s'aconsegueix un temps de resposta més ràpid. Augmentant el temps d'integració es pot arribar a eliminar el sobrepic.

La següent gràfica és la que resulta de la simulació de un control PID amb els valors $K_p = 40$, $T_i = 70$ s i $T_d = 12,5$ s.



Gràfic 5.32: Representació del *set point* del sistema (en blau) enfront de la resposta amb el controlador PID (en vermell). Els valors de les constants del PID són $K_p = 40$, $T_i = 70$ i $T_d = 12,5$. Ajust manual de els valors de sintonia resultants per Ziegler Nichols.

5.4.2. Controladors estació de pressió

Per a l'estació de pressió s'utilitzarà el mètode d'assignació de pols per tal de calcular les constants del controlador. Per a visualitzar el mètode s'utilitzarà l'aplicació del Matlab "Control System Designer".

Aquesta aplicació ens permet visualitzar en el pla real i del complex les arrels i zeros de la funció de transferència del sistema i simultàniament a la resposta obtinguda amb un control especificat.

Mitjançant aquesta aplicació es pot veure de manera interactiva i ràpida l'efecte que té el posicionament de zeros i pols de la funció en la seva resposta.

En la introducció hi ha un apartat on es detalla com utilitzar-la.

5.4.2.1. Controlador PI

Per a trobar els valors del controlador PI s'utilitzarà el mètode del lloc geomètric de les arrels.

El mètode ens permet determinar els pols de la funció de transferència en llaç obert en funció del guany k . Es calcularà les constants del PI per els valors de les variables k , ξ i ω_n trobats en cada experiment.

Com ja havíem determinat anteriorment la funció de transferència per el sistema és la descrita en l'equació (5.40):

$$G_c(s) = k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.40)$$

Per tal de visualitzar interactivament el mètode utilitzarem el Matlab.

Definirem aquesta funció en el "Workspace" de Matlab assignant els valors corresponents a les variables k , ξ i ω_n . En el cas que es mostra en la Figura 5.13 s'han utilitzats els valors trobats per a l'experiment a 4 V.

Ja que es volen determinar els valors del control PI ideal i aquest té com a funció de transferència l'especificada a (5.61), el primer pas, serà modificar la funció de transferència de la planta $G_c(s)$ de tal manera que inclogui el terme integrador, $1/s$. Per aquest motiu la funció de transferència que caldrà utilitzar és la mostrada en la Figura 5.13. Abans d'entrar-la s'haurà d'escriure la comanda prèvia que també es pot veure a la mateixa figura.

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (5.61)$$

```

>> s=tf('s')

s =

    s

Continuous-time transfer function.

>> G_p1=k_data(1)*wn_data(1)^2/(s^2+2*Xi_data(1)*wn_data(1)*s+1)/s

G_p1 =

      3.995
-----
s^3 + 2.148 s^2 + s

Continuous-time transfer function.

```

Figura 5.13: Definició de la funció de transferència del sistema a l'entorn Matlab. Cal notar que la definició dels valors numèrics pot variar. En aquest cas k_data , wn_data , Xi_data , són vectors que contenen els valors de la corresponent constant per a cada experiment.

Un cop definida la nova funció de transferència es crida l'aplicació “Matlab Control System Designer”.

Utilitzant l'aplicació es dissenyarà un control amb una sortida en llaç tancat per a l'estació que sigui estable, sense oscil·lacions i presenti un temps de resposta raonable.

Ja que la funció de transferència del PI és:

$$G_{PI}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

i el terme $\frac{1}{s}$ s'ha incorporat ja en la funció de transferència, s'observa que per el disseny del controlador sols caldrà introduir un zero real:

$$G_{PI}^*(s) = K_p \left(s + \frac{1}{T_i} \right)$$

Per el cas del model obtingut en l'experiment de 4V s'ha seleccionat un control amb el polinomi següent:

$$0,067416(s + 0,6736)$$

(5.62)

Aquesta expressió ens dona la resposta del sistema que es pot observar a en la Figura 5.14.

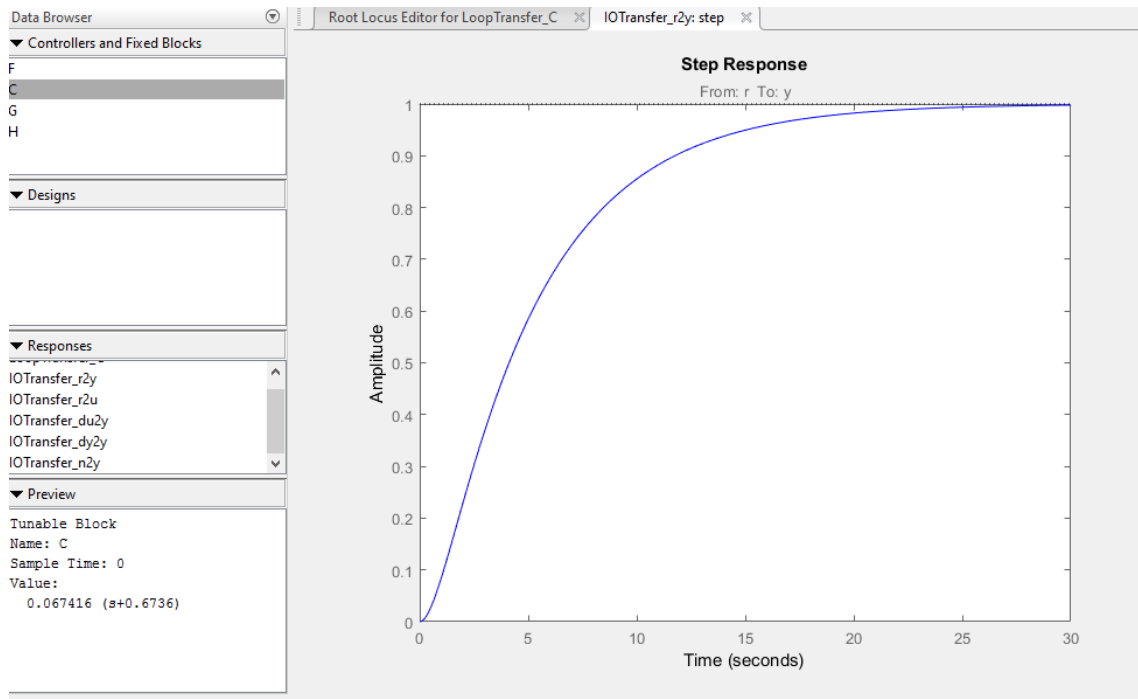


Figura 5.14: resposta obtinguda amb un controlador PI definit per el polinomi $0,067416(s + 0,6736)$.

Sobre el gràfic obtingut podem extreure paràmetres importants com es ara el temps de pic o el temps d'establiment entre d'altres.

Igualant el polinomi a l'estructura G_{PI}^* podem obtenir el valor per K_p , i T_i .

$$0,067416(s + 0,6736) = K_p \left(s + \frac{1}{T_i} \right)$$

$$K_p = 0,067416$$

$$T_i = \frac{1}{0,6736} = 1,4846$$

(5.63)

Obtenint les constants resultants de fer aquest procés amb les diferents funcions de transferència obtingudes per les diverses experiències obtenim els resultats de la Taula 5.2.

Taula 5.2: Taula de resultats obtinguts per a les constants del PI amb les dades dels diferents experiments.

	Termes funció de transferència en llaç obert			Paràmetres del control PI		Resposta en llaç tancat	
Voltatge Experiment	k	ξ	ω_n	K_p	T_i	Temps d'estabilització (s)	Temps de pujada (s)
4V	0,58	0,41	2,63	6,74E-02	1,48	19,4	10,6
5V	0,73	0,57	2,59	3,71E-02	3,78	18,5	8,71
6V	0,88	0,61	2,80	2,22E-01	5,11	19,2	7,77
7V	1,05	0,66	2,50	6,50E-02	2,03	13,8	8,85
8V	1,24	0,75	2,39	1,18E-01	3,69	17,9	9,3

5.4.2.2. Controlador PID

De manera semblant a la sintonia del PI, en el cas del PID tenim la funció de transferència:

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (5.64)$$

Com a resultat d'incorporar el terme $\frac{1}{s}$ a la funció de transferència, s'observa que per el disseny del controlador sols caldrà introduir dos zeros:

$$G_{PID}^*(s) = K_p \left(T_D s^2 + s + \frac{1}{T_i} \right)$$

$$G_{PID}^*(s) = K_p T_D \left(s^2 + T_D s + \frac{T_D}{T_i} \right) \quad (5.65)$$

Per fer la sintonia del control PID es realitzarà per el mateix mètode utilitzat en el controlador PI, la localització geomètrica dels pols.

Utilitzant la aplicació “*Controllers and Fixed Blocks*” és farà el posicionament de pols . Es seguiran els mateixos passos ja explicats per el anterior controlador. En el cas del control PID equival a dos zeros complexes a la funció de transferència del sistema en un llaç tancat.

Al igual que en el cas del PI un cop aconseguir el polinomi que ens defineix el controlador es calcularan els paràmetres del PID.

Per l'experiment realitzat amb una entrada a la bomba de 4 V obtenim el valor

$$1,1021 (s^2 + 1,844s + 0,9073) \quad (5.66)$$

Amb aquest valor s' obtindran els paràmetres tal i com es mostra en l'equació (5.67).

$$1,1021 (s^2 + 1,844s + 0,9073) = K_p T_D \left(s^2 + T_D s + \frac{T_D}{T_i} \right) \quad (5.67)$$

Els resultats obtinguts per a cada funció de transferència en llaç obert prèviament calculades experimentalment es poden observar en la Taula 5.3. Les constants característiques de la resposta en llaç tancat es poden observar en la Taula 5.4.

Taula 5.3: Taula de resultats obtinguts per a les constants del PID amb les dades dels diferents experiments.

	Termes funció de transferència en llaç obert			Paràmetres del control PID		
Voltatge Experiment	k	Xi	wn	Kp	Ti	Td
4V	0,58	0,41	2,63	5,85E-01	2,08	1,8844
5V	0,73	0,57	2,59	5,62E-01	3,50	0,9889
6V	0,88	0,61	2,80	4,10E-01	1,29	1,7720
7V	1,05	0,66	2,50	2,13E-01	3,75	1,0460
8V	1,24	0,75	2,39	2,82E-01	2,45	1,6170

Taula 5.4: Taules amb les característiques obtingudes per a les respostes en llaç tancat amb els controladors sintonitzats amb les dades experiments corresponents.

Voltatge Experiment	Temps de pic (s)	Sobre pasament (%)	Temps d'estabilització (s)	Temps de pujada (s)	Valor de la resposta en l'estat estacionari
4V	2,50	0,40%	1,27	0,58	1
5V	10,00	0,10%	7,18	4,05	1
6V	2,51	6,88%	4,41	0,80	1
7V	18,00	0,00%	10,90	6,55	1
8V	4,66	3,26%	6,72	1,69	1

5.5. Discussió dels resultats

En la discussió de resultats es valorarà els resultats obtinguts per a la modelització del sistema i els obtinguts per el control a part.

5.5.1. Resultats per els models de les estacions

Per tal de valorar els resultats obtinguts utilitzarem la eina del Matlab "System Identification". Compararem els resultats obtinguts per la simulació del model proposat en el projecte amb els obtinguts amb l'eina.

Per a cada estació s'avaluaran diversos tipus de models amb l'aplicació. S'escollirà el que tingui millor ajust a les dades experimentals.

Estació de nivell

Amb l'eina "System verification" s'importaran les dades obtingudes en els experiments en llaç obert. S'avaluaran model de diferents tipus i s'escollirà el que millor s'ajusti a les dades.

En el cas de l'estació de nivell els tipus de models plantejats han sigut:

- P1: Sistema de primer ordre sense retard
- P2: sistema de segon ordre amb pols reals
- P2: segon ordre amb pols reals
- P2D: segon ordre amb pols reals i retard

Els resultats dels models així com el seu factor de confiança es poden veure a la Figura 5.15.

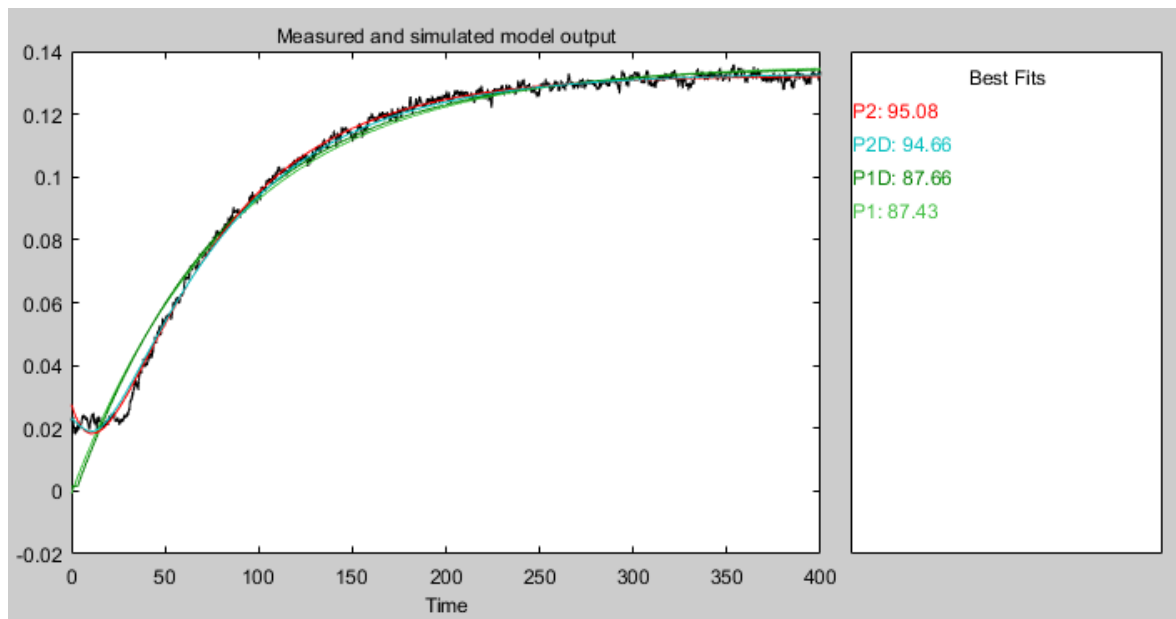
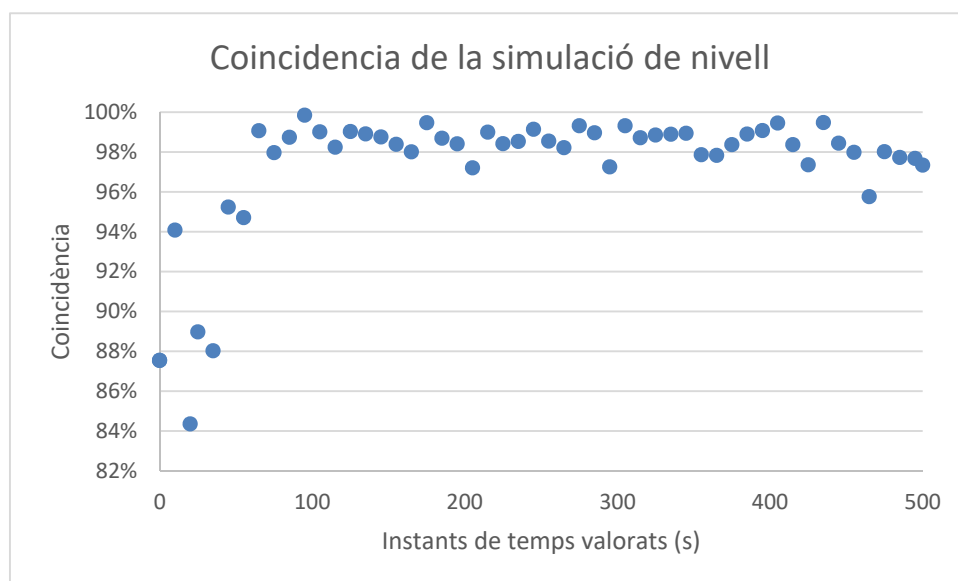


Figura 5.15: Resultats de l'ajust dels model a les dades experimentals (en negre). S'aprecia que el que té millor ajust és el model de segon ordre amb pols reals (P2).

A l' apartat de modelització es va plantejar el model matemàtic amb les equacions físiques resultats de plantejar el balanç de pressions. Si comparem les dades aconseguides amb la nostra simulació a les experimentals per els mateixos instants de temps (54 mostres) i en calculem l'error relatiu obtenim el resultat de una mitjana de coincidència del 97% (com es pot apreciar en el Gràfic 5.33).



Gràfic 5.33: Coincidències de valors entre la simulació de l'estació de nivell i el resultat experimental. Per les primers instants de temps s'observa més desviació.

Per tant per el nostre model de simulació es pot afirmar que es té una representació molt bona del funcionament de l'estació. Aquest fet ens demostra la major precisió del model plantejats teòricament en front dels de caixa negra.

De cara les pràctiques docents es recomana fer servir com a model la funció de transferència de un sistema de primer ordre amb retard (P1D). Tot i que la coincidència no és tan bona (87,66%) és molt més pràctic de plantejar que el model teòric i d'aquesta manera en el transcurs de les pràctiques es veu un exemple de primer ordre en forma de l'estació de nivell i un de segon ordre amb la de pressió.

Estació de pressió

Amb l'eina "System verification" s'importaran les dades obtingudes en els experiments en llaç obert. S'avaluaran diferents models i s'escollirà el que millor s'ajusti a les dades.

En el cas de l'estació de pressió els tipus de models plantejats han sigut:

- P1: Sistema de primer ordre sense retard
- P2: sistema de segon ordre amb pols reals
- P2U: segon ordre amb pols complexes
- P3U: tercer ordre amb pols complexes

Els resultats dels models així com el seu factor de confiança es poden veure a la Figura 5.16

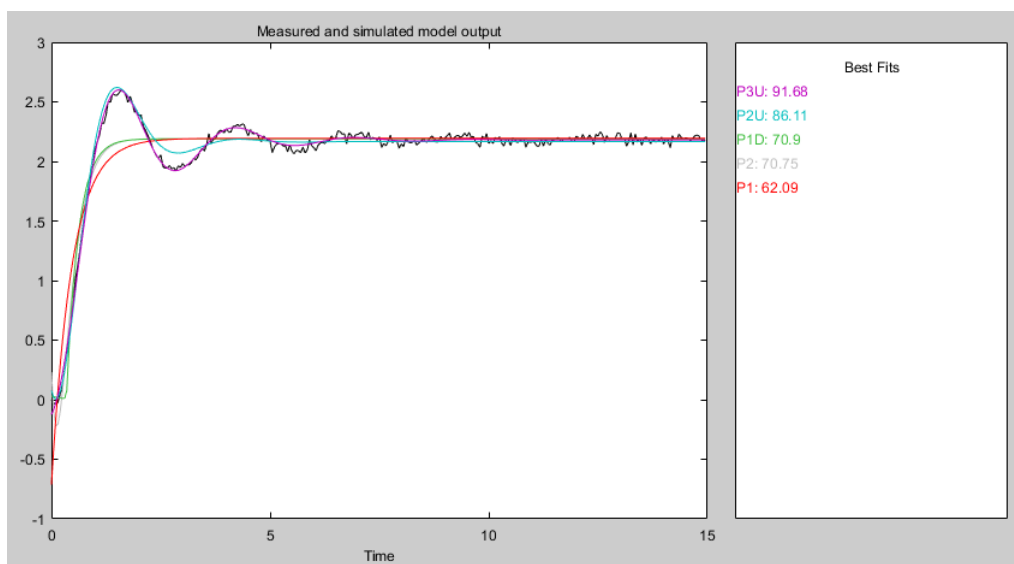


Figura 5.16: Resultats de l'ajust dels model a les dades experimentals per l'experiment en llaç obert de 4 V (en negre). S'aprecia que el que té millor ajust és el model de tercer ordre amb pols complexes (P3U).

A l' apartat de modelització es va suposar una funció de transferència de segon ordre amb pols complexes. Un cop valorats els resultats s'ha vist que un sistema de tercer ordre amb pols complexes té millor coincidència amb les dades que el model plantejat. Una comparació gràfica entre els dos i els resultats experimentals es pot observar en la Figura 5.17.

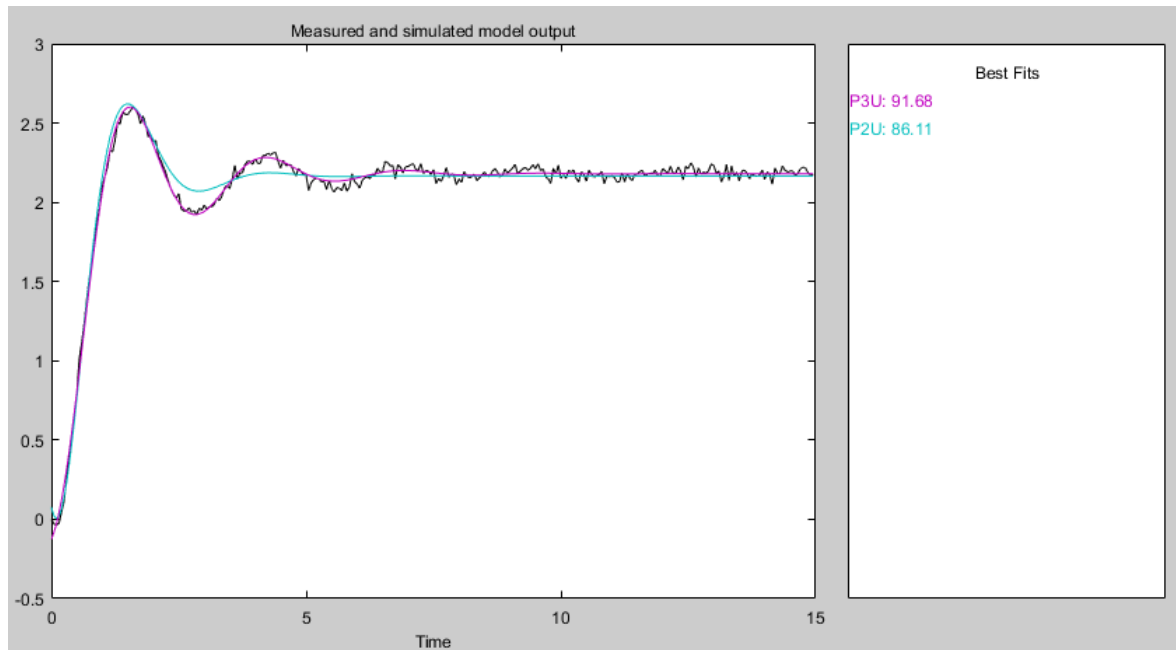


Figura 5.17: Detall de la resposta del model P2U i P3U enfront les dades experimentals (en negre).

Tot i que el model escollit té una coincidència força acceptable (86.11%) cal destacar que el sistema és definit amb més exactitud per un tercer ordre amb pols complexes.

De cara les pràctiques docents es recomana fer servir de tota manera la funció de transferència general per un sistema de segon ordre. Per el nivell de l'estudiant és més recomanable i segueix tenint un ajust força acceptable.

5.5.2. Resultats per a la sintonia de controladors

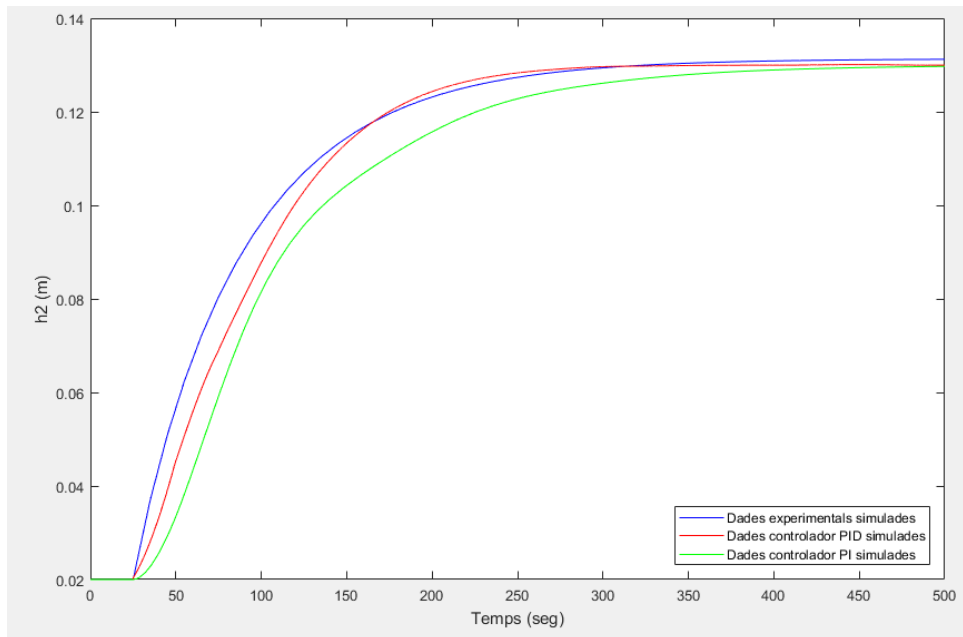
Malauradament els controladors trobats per sintonia no han pogut ser provats en les estacions reals ja que en el moment que es van obtenir els resultats ja havien estat desmuntades per a un altre projecte com s'explica en més detall en l'apartat de conclusions.

Per tant els resultats dels controladors s'avaluaran utilitzant simulació del sistema que anteriorment s'ha discutit sobre la seva fiabilitat.

Estació de nivell

En el es pot observar els resultats de la simulació de l'experiment a llaç obert. Els controladors utilitzats han sigut els sintonitzats manualment a partir de la primera sintonització amb el mètode de Ziegler Nichols.

Podem observar que per termes de velocitat el més adequat és el control PID ja que fins i tot arriba al valor de l'estat estacionari abans que la resposta en llaç obert del sistema.



Gràfic 5.34: Comparació entre les simulacions de la resposta del sistema en llaç obert i la resposta amb els controladors proposats en llaç tancat. Les constants per al PI són $K_p = 35$ i $T_i = 75$. Les constants per al PID són $K_p = 40$, $T_i = 70$ i $T_d = 12,5$. L'entrada de referència coincidí amb el nivell al qual s'estabilitzava la resposta del llaç obert i era aproximadament 0,13 m.

El controlador P no s'ha avaluat ja que no s'ha considerat rellevant.

Estació de pressió

S'avaluaran els resultats obtinguts sobre la resposta en llaç tancat per a una consigna de 1 V obtinguts en l'apartat 5.4.2.2

Fixant-nos en els resultats obtinguts en la Taula 5.4 podem afirmar que el control que obté una resposta més ràpida i que per tant té un temps de pujada més baix, és el trobat amb l'experiment de 4 V tot i que inclou una mica de sobre passament és un valor negligible (0,4%).

A la vegada aquest mateix control és el que té un temps d'estabilització més baix.

Per contra el control sintonitzat amb les dades experimentals de l'entrada de graó a 7V és el de resposta més lenta. Per l'altra banda és l'únic dels controls que no té gens de sobre passament, probablement gracies a la seva dinàmica més lenta.

Taula 5.4: Taules amb les característiques obtingudes per a les respostes en llaç tancat amb els controladors sintonitzats amb les dades experimentals corresponents.

Voltatge Experiment	Temps de pic (s)	Sobre passament (%)	Temps d'estabilització (s)	Temps de pujada (s)	Valor de la resposta en l'estat estacionari
4V	2,50	0,40%	1,27	0,58	1
5V	10,00	0,10%	7,18	4,05	1
6V	2,51	6,88%	4,41	0,80	1
7V	18,00	0,00%	10,90	6,55	1
8V	4,66	3,26%	6,72	1,69	1

Caldria valorar per un punt de treball concret quins dels controladors trobats obté una millor resposta segons els paràmetres que es considerin adients.

5.6. Proposta de pràctica docent

Es pot trobar la proposta del guió de pràctiques en el primer apartat dels annexes. Per ha la seva elaboració s'han reaprofitat d'altres seccions del treball que compartien contingut com per a la introducció i la descripció de les estacions.

6. CONCLUSIONS

El treball ha explorat diverses maneres i eines per a la resolució del control de les estacions. S'ha d'entendre aquesta memòria com un recull d'aquesta exploració.

Finalment s'ha decidit optar per els procediments descrits en la proposta de guió de pràctiques de l'annex.

El projecte realitzat proposa un model que defineix el comportament de cada estació juntament amb l'ajust de les constants característiques determinades experimentalment.

Aquest models inicialment es volien plantejar fent servir balanços d'energia amb l'equació de Bernuilli. Durant el seu desenvolupament es va fer palès que el càlcul dels mateixos es complicaria en excés a causa de la desconexença de dades tècniques de la bomba utilitzada en les estacions.

Tenint aquest fet en ment és recomana que per a les pràctiques amb estudiants s'ajustin a les funcions de transferència típiques per a sistemes ja que facilita enormement el càlcul de les constants característiques.

També s'han realitzat els models per a la seva simulació en l'entorn Simulink. Es considera que és una tasca amb un gran interès des de el punt de vista de la comprensió de la dinàmica dels sistemes.

El fet de poder modificar els paràmetres característics i veure en un simple "click" com aquest determinen la resposta resulta molt interessant per a tal de visualitzar amb claredat la influència que exerceixen en el mateix.

Respecte a la sintonia de controladors s'han tingut en consideració diversos mètodes. Finalment ens hem decidit per realitzar dos mètodes, un d'empíric i un altre d'analític però realitzant-lo de manera molt practica gràcies a l'ajut de de Matlab.

El mètode empíric escollit ha sigut el de Ziegler Nichols de la resposta en llaç obert de un sistema a una entrada graó. S'ha triat aquest mètode per a la seva relativa senzillesa. També és valora positivament el fet de que sigui un mètode de resolució gràfic ja que sol afavorir la comprensió de la tasca realitzada.

El mètode analític escollit ha sigut el de la localització geomètrica de les arrels d'una funció. S'ha escollit aquest mètode per la possibilitat de realitzar-lo de manera molt interactiva amb l'ajut de l'aplicació "*Controllers and Fixed Blocks*" tal i com es mostra en l'apartat de resultats.

Als annexes del projecte es presenta una proposta de guió de pràctiques amb l'actual configuració de les estacions.

A la data en que s'entrega aquest treball de fi de grau n'hi planificat un altre amb l'objectiu de renovar les 5 plantes presents en el laboratori de Control de l'EPSEM entre les quals hi ha les dues estacions sobre les que s'han realitzat aquest treball.

Per a la estació de nivell, seria interessant que s'instal·lés un control addicional en el tanc B101 així com caracteritzar millor la bomba.

Això permetria plantejar el model matemàtic per a l'estació utilitzant el balanç d'energia de Bernuilli tal i com s'havia proposat. També s'establiria un control més complert ja que es controlaria la variable del primer tanc. Seria interessant a nivell de practiques que els estudiants plantegessin dues tipologies de model diferents.

Per a l'estació de pressió seria interessant arreglar la vàlvula automàtica que té i plantejar el control amb ella. Aquest canvi implicaria que el control de les dues estacions es fa amb actuadors diferents i incorporaria un nou element en les practiques molt freqüent en el control automàtic com són les vàlvules.

Aquests canvis implicarien la revisió del guió de pràctiques proposat.

S'espera que després de la posada a punt de les estacions aquest projecte sigui un punt de partida per a la realització de pràctiques de control de processos industrials.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Coughanowr, D.R. i Koppel, L.B., 1965. Process systems analysis and control. A: *McGraw-Hill chemical engineering series*. p. 491.
2. Noguera, X.G. *Chemical processes simulation and control*. 2015, UPC, EPSEM. [Apunts de classe]
3. Astrom, K., 1995. *PID controllers: theory, design and tuning*. ISBN 1556175167.
4. Antonio Visioli., 2006. *Practical PID Control* [en línia]. ISBN 9780857296344.
5. Knospe, C., 2006. PID control. A: *Control Systems, IEEE*. Vol. 26, núm. 1, p. 216-251. ISSN 1066-033X.
6. H. Bischoff, D. Hofmann, E. V. Terzi, 1997. *Manuals Festo, sobre les estacions*, [disponibles al laboratori de control de la EPSEM]
7. Johnsons Pump, *Instrucion Manual: Heavy Duty , Magnetic driven , Seal-less , Circulating pumps CM10P7-1, CM30P7-1*.

8. ANNEXOS

8.1. Annex 1: Proposta de guió de pràctiques

1. Introducció

La pràctica consisteix en l'estudi de dues maquetes. S'ajustarà el model matemàtic que en descriu el seu comportament.

Mitjançant l'aplicació Simulink del programa Matlab es simularà el comportament de les estacions un cop s'hagin ajustat els seus models.

Finalment es sintonitzarà un controlador per tal de fer un control automàtic del procés.

A continuació s'explicaran dos mètodes de sintonització de controladors. El mètode de la resposta lliure a una entrada graó de Ziegler Nichols i el mètode del lloc geomètric de les arrels.

1.1. Sintonia de controladors.

Anàlisi empíric: Ziegler Nichols

Les tècniques descrites per Ziegler Nichols al 1942 han sigut i segueixen sent el pilar de la sintonia de PID. Avui en dia hi segueixen havent moltes tècniques que es basen en elles o en són modificacions.

Mètode de resposta a entrada graó

El primer mètode empíric presentat per Ziegler Nichols és el de la resposta en llaç obert a una entrada graó amb la qual es determinaran dos paràmetres característics per la sintonia del PID.

Un cop obtinguda la corba de la resposta, gràficament es dibuixa una recta tangent al punt de màxim pendent de la corba. El punt on la recta ens talla amb l'eix d'abscisses determina el paràmetre L . El punt on la recta talla a l'eix de ordenades ens determina el paràmetre a .

Un exemple de la resolució gràfica pot ser mostrada en la següent imatge.

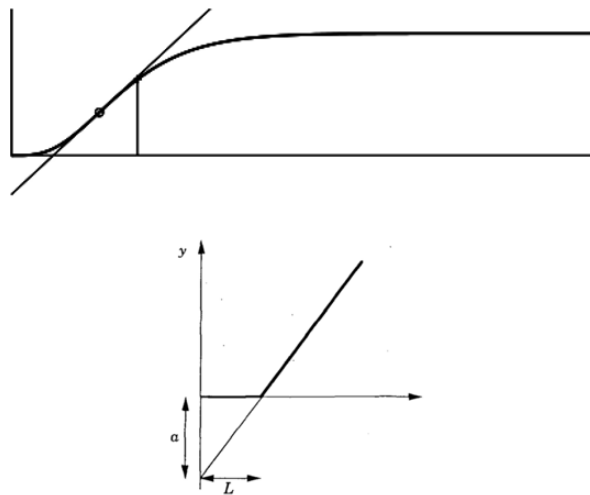


Figura A1.1: Exemple del mètode de resolució gràfic de Ziegler Nichols. En la primera figura es pot observar la corba de resposta del sistema en laïç obert a una entrada graó així com el dibuix de la recta tangent a el punt de màxim pendent de la corba. En la segona figura és mostra un exemple de com determinar els paràmetres a i L mitjançant els punts de tall de la recta tangent amb els eixos de coordenades.

Un cop els paràmetres han sigut determinats es pot calcular els valors del PID seguint les equacions de la Taula A1.1.

Taula A1.1: Paràmetres de control del PID obtinguts amb el mètode de resposta a entrada graó de Ziegler Nichols. Font: (Astrom, K., 1995).

Tipus de controlador	K_p	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4 \cdot L$
PI	$0,9 \cdot a$	$3 \cdot L$		$5,7 \cdot L$
PID	$1,2 \cdot a$	$2 \cdot L$	$0,5 \cdot L$	$3,4 \cdot L$

Mètode analític: Assignació de pols

El mètode del lloc geomètric de les arrels o “root locus” en anglès és un mètode clàssic de anàlisi de sistemes lineals en laïç tancat. En funció de un paràmetre, en general un guany corresponent a un controlador de tipus proporcional, s’anitzaran les possibles arrels per a la funció de transferència en laïç tancat avaluada.

Aquest mètode ens permet trobar els pols de una funció de transferència en llaç tancat en funció de un guany k i a partir de la seva funció de transferència en llaç obert. És una eina molt útil per tal de valorar sistemes dinàmics lineals (SISO).

Els SISO son sistemes amb una sola entrada i una sola sortida.

Donat un sistema en llaç obert representat per la funció de transferència $G(s)$, el lloc geomètric representa en el pla S tots els possibles valors de les arrels de la funció característica del sistema en llaç tancat definida com $1 + kG(s)$ quan k varia de 0 a ∞ . Un exemple, obtingut amb Matlab, es presenta en la Figura A1.2. En aquesta figura s'observa que les "x" blaves indiquen els pols del sistema en llaç obert (quan $k=0$) i les "o" vermelles mostren els zeros del sistema en llaç obert ($k = \infty$).

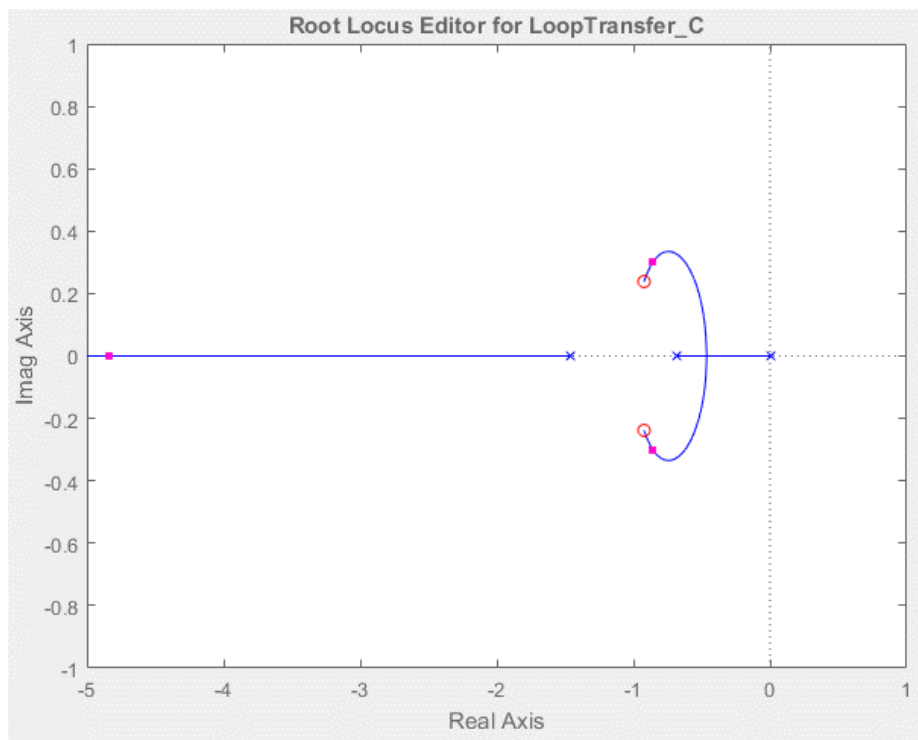


Figura A1.2: Exemple de l'aplicació del mètode i les arrels trobades per a una funció de transferència $G(s) = \left(k \cdot \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}\right) / s$.

2. Materials i mètode

A continuació es descriuran les dues estacions així com el mètode per a la seva operació.

Estació de nivell

La funció de la estació es regular el nivell d'aigua del tanc B102 mitjançant l'acció del sensor que ens proporcionarà un valor de 0 a 10. Sent 10 el tanc buit i 0 completament ple.

El sistema de control de nivell consta d'un circuit tancat amb dos tancs connectats (Figura A1.3).

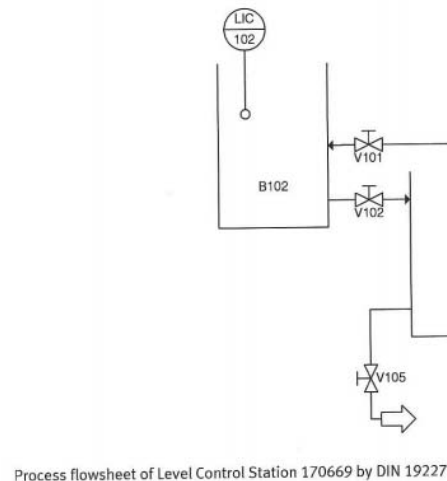


Figura A1.3: Esquema de la estació de nivell (Font: FESTO Control System Manual A pàg. 18)

L'aigua és impulsada des del tanc inferior (B101) al tanc superior (B102) per una bomba (P101) a través d'un conducte el qual pot ser limitat mitjançant l'acció d'una vàlvula manual (V101). Aquets corrent es denominarà com a corrent d'entrada o q_i .

Des del tanc B102 l'aigua retorna lliurement al B101 a través de un conducte del qual podem variar la seva resistència mitjançant una vàlvula manual (V102). Aquest segon corrent serà anomenat corrent de sortida o q_o .

Es disposa d'un sensor de nivell (LIC/102) ubicat en el tanc B102 per tal de realitzar aquest control.

La vàlvula manual V105 serveix per a drenar el tanc B101 de l'aigua i en general romandrà tancada.

Podem observar una imatge de la estació en la Figura 4.10.

Operació

Per tal d'operar amb aquesta estació es mantindran les vàlvules manuals V101 i V102 obertes tal i com es mostra en la Figura A1.4.

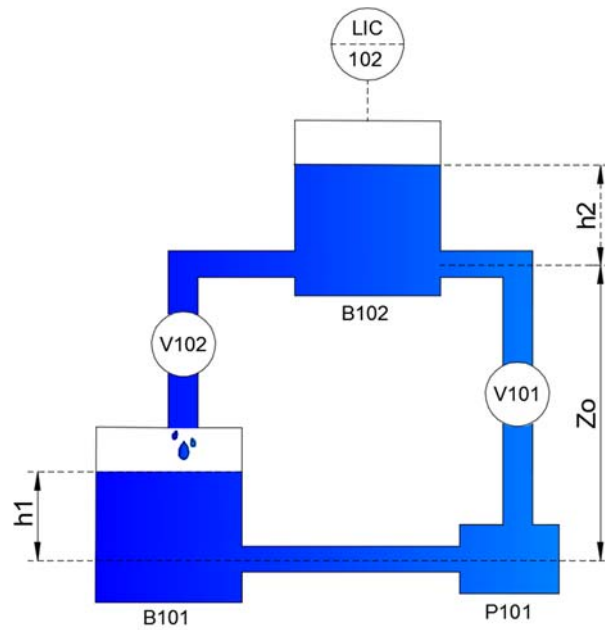


Figura A1.4: Esquema de l'operació de l'estació de nivell

La vàlvula V105 ha d'estar tancada en tot moment ja que serveix per a drenar l'estació i interferiria en el seu correcte funcionament. Es pot observar una imatge la estació en la Figura A1.5.



Figura A1.5: Foto de l'estació de control de nivell

Es pot assumir que el comportament del nivell de l'aigua el tanc B102 és equiparable a un sistema de primer ordre amb retard.

Estació de pressió

Els principals elements de la estació de pressió són:

- Sensor de pressió, piezoresistiu (PIC/303)
- Bomba (P301)
- Motor controlador per a la bomba
- Vàlvula proporcional amb mòdul de control electrònic (V306)
- Tanc de fluid (B301)
- Tanc pressuritzat (B303)
- Sistema de canonades

En aquesta estació la variable a controlar serà la pressió dins el tanc B303. Aquesta pressió és mesurada gràcies a l'acció del sensor situat en el mateix tanc.

Aquesta mesura és donada en forma de valor que oscil·larà entre 0 i 10. La funció del control serà mantenir la pressió a el nivell desitjat durant l'operació en el cas que apareguin distorsions.

Com es pot observar en la Figura A1.6 la bomba P301 impulsa l'aigua a través del sistema de canonades fins al tanc pressuritzat B303 on la pressió es mesurada. Per tal de regular aquest flux hi ha la vàlvula manual V303, i la vàlvula proporcional V306.

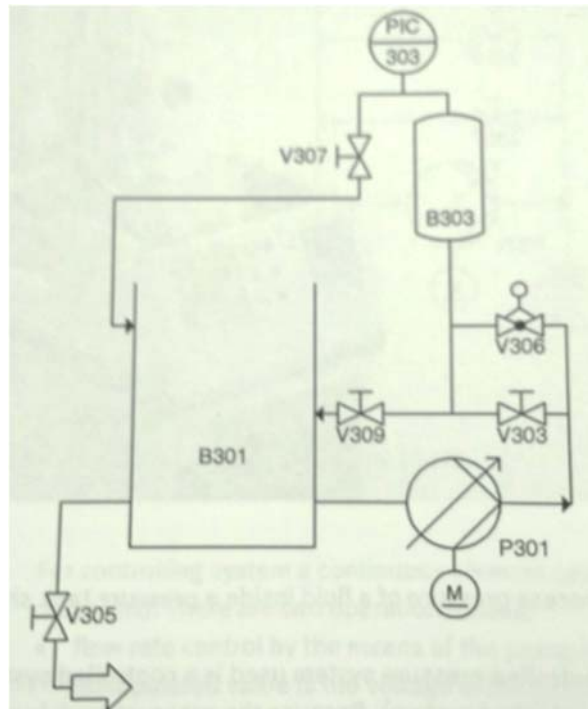


Figura A1.6: Esquema de l'estació (Font: FESTO Control System Manual A pàg. 22)

L'aigua pot retornar al tanc B301 a través de la canonada regulada per la vàlvula manual V309.

La vàlvula V307 ens permet l'entrada i sortida d'aire al tanc pressuritzat B303.

Operació

Per operar amb aquesta estació es mantindran les vàlvules manuals V307 i V309 tancades per tal de crear estanqueïtat en el tanc B303. Aquest fet permetrà, amb l'acció de la bomba P301, augmentar o disminuir la pressió, variable que serà controlada.

Amb la configuració d'aquesta estació es pot fer el control de la pressió de dues maneres:

- Controlant la restricció de la vàlvula proporcional mitjançant el voltatge aplicat a la mateixa. En aquest cas el voltatge aplicat a la bomba ha de ser un valor fixe.
- Controlar la pressió mitjançant l'acció de la bomba P103. La variable a manipular és el voltatge que és aplicat a la bomba que determina la seva velocitat de revolució.

En el nostre cas s'operarà mitjançant l'acció de la bomba degut a l'estat actual de l'estació que no permet fer el control amb la vàlvula proporcional.

La vàlvula manual V303 es mantindrà oberta per permetre el pas de l'aigua cap al tanc pressuritzat B303. En cas que s'utilitzés la vàlvula V306 per al control la V303 romandria tancada.

Per despressuritzar o buidar el tanc B303 d'aigua s'obriran les vàlvules V307 i V309.

Es pot observar un esquema de com opera l'estació en la Figura A1.7, on es mostra la configuració de les vàlvules (en vermelles les que estan en posició tancada). És important notar que per a un funcionament òptim del sistema es recomana que el nivell d'aigua en el tub de plàstic transparent paral·lel al tanc de pressió sigui omplert fins la marca.

L'objectiu de l'estació és el de controlar la pressió dins el tanc pressuritzat mitjançant l'acció de la bomba

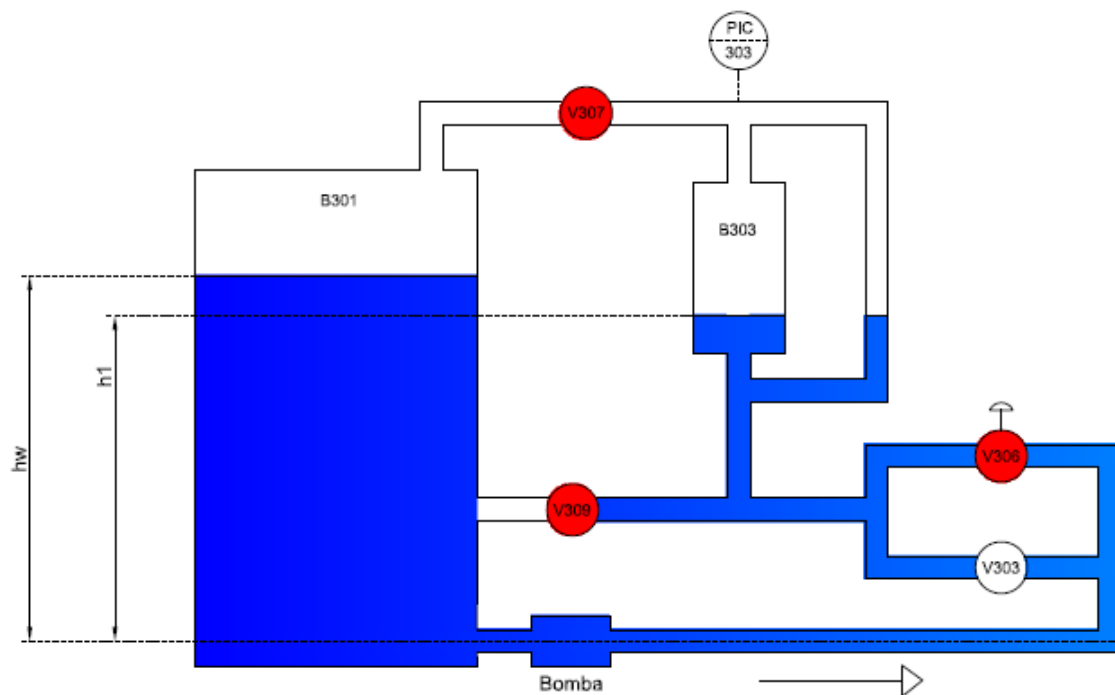


Figura A1.7: Esquema de l'operació de l'estació de pressió

El comportament de l'estació es pot assumir que és el de un sistema de segon ordre.

3. Procediment

Experiment 1: Resposta lliure del sistema a una entrada graó (temps estimat: 20 minuts)

L'experiment consisteix en observar la resposta del sistema a diferents entrades graó. Les dades del sensor de nivell serà enregistrades amb l'ajuda d'una tarja d'adquisició de dades.

Per a la configuració de vàlvules de l'estació consulteu l'apartat d'operació de l'estació de nivell. Es recomana un nivell de al menys 200 mm en el tanc B101 abans de començar les experiències.

Connecteu els cables de la sortida analògica del sensor i l'entrada a la bomba tal i com es mostra en la imatge.

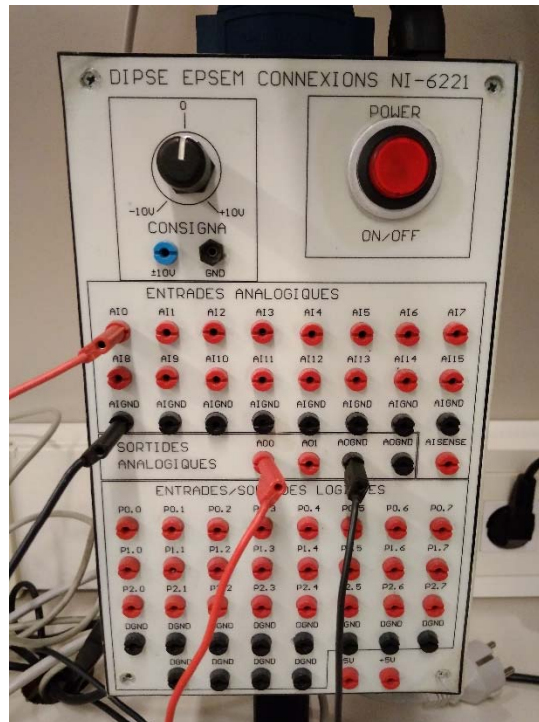


Figura A1.8: Connexions en la tarja d'adquisició de dades

Obriu l'aplicació del controlador de dades. Seleccioneu l'opció de "resposta del sistema".

Us apareixerà la finestra següent:

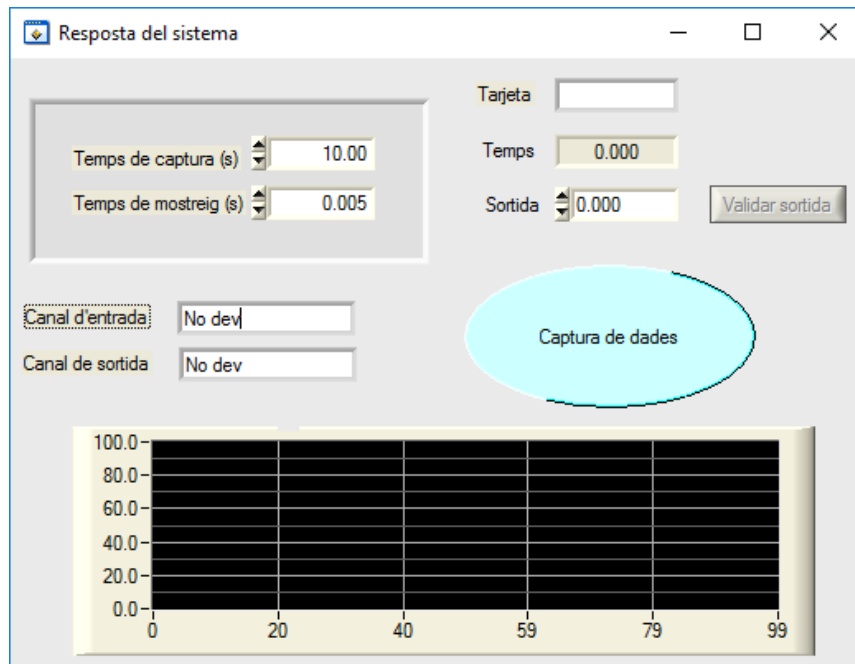


Figura A1.9: Interfície de captura de dades de l'aplicació control de dades

Selecioneu en el canal d'entrada el AI0 i en el de sortida el A00. Per aquest primer experiment es recomana un temps de captura de 200 segons i un temps de mostreig de 0,05 segons.

La casella de sortida representa el voltatge aplicat a la bomba. En aquesta ocasió durant tot l'experiment es farà servir un sol valor.

Quan estiguem apunt per començar pitjarem el botó de captura de dades. Guardarem el fitxer amb el nom "Exp1_Nivell_XV.txt" depenent del voltatge aplicat a la bomba.

Aquesta experiència es realitzarà per a 4, 5 i 6 volts aplicats a la sortida. Entre experiments deixeu temps suficient perquè l'aigua retorni al tanc B101.

Per a cada experiència anoteu l'alçada de líquid inicial en el tanc B101 i l'alçada al final de l'experiment en el tanc B102.

Les dades es guardaran en forma de matriu. La primera columna és el temps en segons, la segona el voltatge aplicat a la bomba i la tercera la lectura del sensor en volts.

Experiment 2: Sintonia manual de control PID (temps aproximat: 40 minuts)

Amb l'estació de nivell encara connectada seleccioneu l'opció de controlador PID de l'aplicació "Controlador de dades". La finestra que obtindreu serà com la següent.

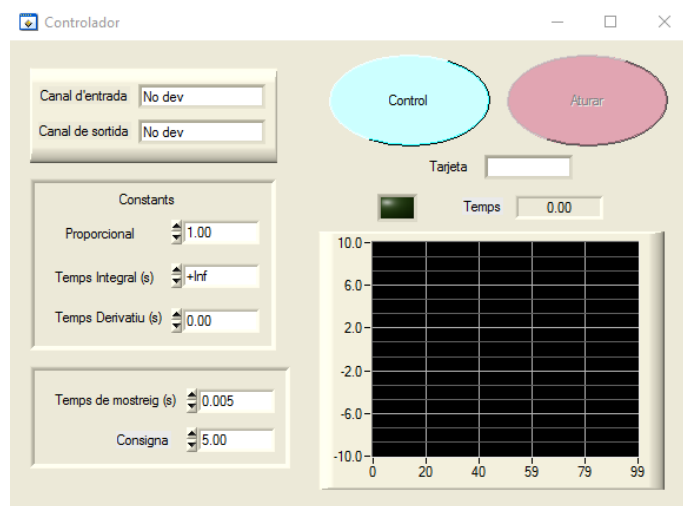


Figura A1.10: Interfície de l'opció de control PID de l'aplicació del controlador de dades

Haureu de configurar les opcions de Canals d'entrada i sortida tal i com ho heu fet per l'experiment anterior. Feu servir 0.05 segons per al temps de mostreig.

Podeu modificar els valors de les constants del control en la sub-finestra de constants. Si no voleu introduir un tipus d'acció de control assigneu-li un valor de 0 o +inf en el cas del Temps integral.

La consigna és el set point del vostre control. Assigneu-li un valor de 5 tal i com ve per defecte.

Feu la sintonia manual per a un controlador P, PI i PID.

Per a sintonitzar manualment es recomana:

- Per el control P: Augmenteu la constant proporcional (K_p) per a millorar el temps de resposta.
- Per el control I: El seu objectiu és aconseguir un error d'estat zero en l'estat estacionari. Per a valors massa petits fa oscil·lar el sistema però aneu amb compte perquè per a valors massa grans el temps d'estabilització serà dolent.
- Per el control D: Augmenteu el valor del temps derivatiu en petits increments. Podreu veure el seu efecte en l'augment de la velocitat de resposta però aneu amb compte, per a valors massa grans els sistemes tendeixen a oscil·lar.

Mireu de obtenir una resposta del sistema estable i sense oscil·lacions. Anoteu els paràmetres del control.

Guardau els fitxers de dades amb el nom "Exp2_Nivell_P.txt" depenen del tipus de control.

Les dades es guardaran en forma de matriu. La primera columna és el temps en segons, la segona la consigna, la tercera la lectura del sensor en volts i la quarta el voltatge aplicat a la bomba.

Estació de pressió

Experiment 1: Resposta lliure del sistema a una entrada graó (temps aproximat: 20 minuts)

L'experiment consisteix en observar la resposta del sistema a diferents entrades graó. Les dades del sensor de pressió serà enregistrades amb l'ajuda d'una tarja d'adquisició de dades.

Per a la configuració de vàlvules de l'estació consulteu l'apartat d'operació de l'estació de pressió. Es recomana un nivell de al menys 200 mm en el tanc B301 abans de començar les experiències.

Connecteu els cables de la sortida analògica del sensor i l'entrada a la bomba tal i com ho heu fet per a l'estació de nivell.

Obriu l'aplicació del controlador de dades. Seleccioneu l'opció de "resposta del sistema".

Seleccioneu en el canal d'entrada el AI0 i en el de sortida el A00 tal i com hem fet anteriorment. Es recomana un temps de captura de 80 segons i un temps de mostreig de 0,05 segons.

La casella de sortida representa el voltatge aplicat a la bomba. Durant tot l'experiment es farà servir un sol valor.

Quan estiguem apunt per començar pitjarem el botó de captura de dades. Guardarem el fitxer amb el nom "Exp1_Pressio_XV.txt" depenent del voltatge aplicat a la bomba.

Aquesta experiència es realitzarà per a 5, 6 i 7 volts aplicats a la sortida.

Abans de començar l'experiment s'ha de tenir el nivell de l'aigua dins el tanc pressuritzat B303 fins a la marca del tub transparent per afavorir una bona operació del sistema.

Entre cada experiments obriu la vàlvula manual V307 durant uns segons per garantir que l'aire dins el tanc pressuritzat està a pressió atmosfèrica.

Experiment 2: Sintonia manual de control PID (temps aproximat: 40 minuts)

Amb l'estació de pressió encara connectada seleccioneu l'opció de controlador PID de l'aplicació "Controlador de dades". La finestra que obtindreu serà com la següent.

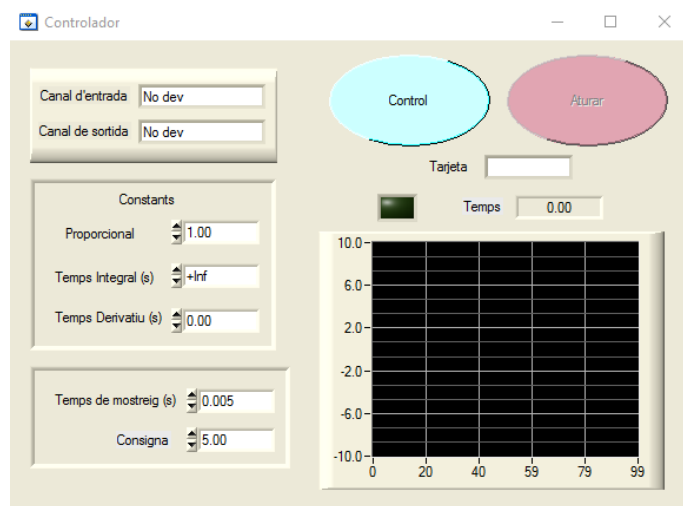


Figura A1.11: Finestra per a configurar el control en l'aplicació del controlador de dades

Haureu de configurar les opcions de Canals d'entrada i sortida tal i com ho heu fet per l'experiment anterior. Feu servir 0.05 segons per al temps de mostreig.

Podeu modificar els valors de les constants del control en la sub-finestra de constants. Si no voleu introduir un tipus d'acció de control assigneu-li un valor de 0 o +inf en el cas del Temps integral.

La consigna és el set-point del vostre control. Assigneu-li un valor de 4 volts.

Feu la sintonia manual per a un controlador PI i PID.

Per a sintonitzar manualment es recomana:

- Per el control P: Augmenteu la constant proporcional (K_p) per a millorar el temps de resposta.
- Per el control I: El seu objectiu és aconseguir un error d'estat zero en l'estat estacionari. Per a valors massa petits fa oscil·lar el sistema però aneu amb compte perquè per a valors massa grans el temps d'estabilització serà dolent.
- Per el control D: Augmenteu el valor del temps derivatiu en petits increments. Podreu veure el seu efecte en l'augment de la velocitat de resposta però aneu amb compte, per a valors massa grans els sistemes tendeixen a oscil·lar.

Mireu de obtenir una resposta del sistema estable i sense oscil·lacions. Anoteu els paràmetres del control.

Guardau els fitxers de dades amb el nom "Exp2_Pressio_P.txt" depenen del tipus de control.

4. Tasques proposades

Per tal de respondre les tasques proposades utilitzarem el programa Matlab i l'aplicació Simulink. Es suposa un nivell bàsic de coneixement en els dos programes per part dels estudiants.

- 1) Plantegeu el balanç energètic utilitzant l'equació de Bernuilli per a les dues estacions. Cal especificar entre quins punts del circuit es planteja.
- 2) Amb els resultats obtinguts per l'experiment 1.
 - a) Representa gràficament la resposta del sistema a les diferents entrades graó en funció del temps.
 - b) Amb la resposta en llaç obert del sistema calcula els paràmetres de la funció de transferència de l'estació corresponent utilitzant el paràmetres de valor de sobre oscil·lació (M_p) i el temps de pic (t_p) de la resposta.
 - c) Realitzeu una simulació en l'entorn Simulink amb la funció de transferència obtinguda en l'apartat anterior. Simuleu la resposta del sistema en llaç obert a les mateixes entrades graó per les quals heu fet els experiments. Compareu els resultats de la simulació amb els experimentals i comenteu-los.
- 3) Amb els resultats obtinguts en l'experiment 2.
 - a) Representa gràficament la resposta del sistema per els diferents controls sintonitzats manualment en l'experiment 2 en funció del temps. Compareu-los amb la resposta en llaç obert i comenteu-los.
 - b) Per els resultats obtinguts en l'estació de nivell aplicant un voltatge de 5.
 - i) Realitzeu el mètode de sintonia empíric de Ziegler Nichols de resposta a una entrada graó en llaç obert per a calcular els paràmetres de un controla P, PI i PID. Representeu la resposta del sistema en funció del temps.
 - ii) Compareu els resultats de l'apartat anterior amb els obtinguts en la sintonia manual i comenteu-los.
 - c) Per els resultats obtinguts en l'estació de pressió aplicant un voltatge de 6 volts
 - i) Realitzeu el mètode de sintonia del lloc geomètric de les arrels amb l'ajuda de l'aplicació "Control System Designer".

Per tal de fer servir l'aplicació heu de seguir les següents instruccions.

S'assignarà la funció de transferència trobada a l'entorn Matlab. Cal tenir en compte que si es vol calcular un PI o PID caldrà modificar la funció de transferència de la planta de tal manera que inclogui el terme integrador, $1/s$. Es cridarà l'aplicació fent servir el valor assignat per a la funció.


```
>> G_p1=k_data(1)*wn_data(1)^2/(s^2+2*Xi_data(1)*wn_data(1)*s+1)/s

G_p1 =

      3.995
-----
s^3 + 2.148 s^2 + s

Continuous-time transfer function.
```

Exemple de definició d'una funció de transferència.

```
>> controlSystemDesigner('rlocus',G_p1)
```

Exemple de crida de l'aplicació “Control System Designer”.

Un cop dins l'aplicació veiem dues pestanyes. La primera “Root Locus Editor for loop Transfer” ens representa els pols i els zeros de la funció de transferència en el pla. La segona “IO_Transfer_r2y:step” ens mostra la resposta del sistema.

Cal tenir en compte que un sistema és estable sempre que tots els seus zeros i pols es trobin situats en el semipla esquerra del pla complex.

La incorporació de un control PI equival a l'addició de un zero real. Per tal de afegir-lo farem clic dret del ratolí sobre el gràfic que ens mostra els pols i els zeros de la funció i seleccionarem “Add Pole/Zero>Real Zero” tal i com es mostra en la Figura 5.13.

Un cop afegit el zero real podrem canviar el valor dels pols de la funció (marcats amb un punt vermell a la gràfica) i el mateix zero per veure quin resultat té sobre la resposta del sistema desplaçant-los per la gràfica. Alternativament podem posar el valor del guany de C fent doble clic sobre el mateix.

Un cop aconseguim una resposta per al sistema que considerem que s'ajusta a les nostres necessitats podrem veure el polinomi del controlador a la finestreta “Preview” si seleccionem el controlador C dins la finestra “Controllers and Fixed Blocks”.

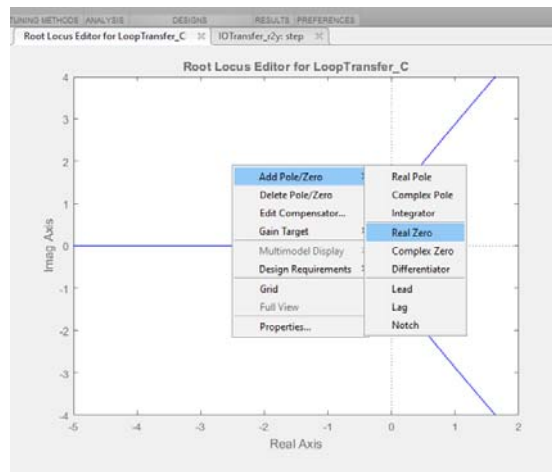


Figura A1.12: Per tal de afegir zeros i pols a el pla ho farem a través del menú que es desplega després de fer clic dret sobre la gràfica.

Anoteu el valor del polinomi del controlador. Calculeu els paràmetres equivalents del PI comparant-ho amb la seva estructura tal i com es mostra en la igualtat següent.

$$K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) = a(s + b)$$

Compareu els resultats obtinguts amb la sintonia manual i comenteu-los